



Escola Politècnica Superior  
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **INGENIERÍA GEOMÁTICA Y TOPOGRAFÍA**

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

**Análisis comparativo de la superficie de la bahía de  
Bombetoka (Madagascar) con imágenes Landsat**

**Proyectista: Anuar Alonso Macia**

**Director: Carolina Puig Polo**

**Convocatoria: Julio 2016**



## Resumen

Este Trabajo Final de Grado tiene como principal objetivo el análisis de la evolución de la bahía de Bombetoka, situada al noreste de Madagascar, con imágenes obtenidas por los satélites Landsat 5 y Landsat 8, en la época de lluvia de diferentes años entre 1995 y 2016.

Para realizar el estudio evolutivo, se ha tenido que analizar varios aspectos por separado y así sacar conclusiones. El primer paso que se ha realizado, es observar la cantidad de sedimentos en suspensión que transporta el río y hasta donde penetran en el océano. Acto seguido se ha realizado un método para detectar aguas poco profundas con la finalidad de ayudar a entender dónde van a parar los sedimentos.

Sabiendo que se tratan de aguas poco profundas y del gran transporte de sedimentos del río, se ha calculado una variación de marea mediante una combinación analítica del año 2000. En esta combinación se muestran zonas donde la línea de costa varía hasta 2 km y aparecen y desaparecen bancos de arena que llegan a medir 3 km de longitud.

Seguidamente se ha calculado que marea había en el instante en el que se realizó la imagen, con la finalidad de hacer un índice de agua sabiendo cuando afecta la marea y donde.

El índice de agua se ha calculado mediante la fórmula  $IA = \frac{B2-B5}{B2+B5}$ , donde la banda dos pertenece al verde y la cinco al infrarrojo cercano. Se ha realizado una combinación de los índices de agua de años consecutivos, en ellas se muestra como constante evolutiva que los pantanos son inundados y crecen los bancos de arena.

Seguidamente, se ha realizado un índice de Vegetación con la fórmula  $NDVI = \frac{B4-B3}{B4+B3}$ , donde la banda tres pertenece al rojo y la cuatro al infrarrojo cercano. En las combinaciones de los índices de vegetación se observa pérdidas de vegetación alrededor de los pantanos y ganancia de vegetación en algunos bancos de arena.

Las conclusiones extraídas del trabajo son varias; la alta erosión del interior de Madagascar hace que el río Bombetoka transporte muchos sedimentos que se van depositando en los campos de arroz cercanos a la cuenca y los pantanos haciendo que pierdan vegetación. Por otra parte, también se depositan en el estuario provocando un crecimiento en los bancos de arena, y sobretodo convirtiendo el estuario en una superficie cada vez más llana. Eso afecta a las mareas que cada vez son más pronunciadas.

La economía de Madagascar se basa en la agricultura y sobre todo en el cultivo de arroz. En la bahía de Bombetoka grandes campos de arroz están siendo afectados por gruesas capas de lodo haciendo perder cosechas y afectando a la economía del país.

## Índice

1	Introducción .....	7
2	Objetivos.....	11
3	Área de estudio.....	12
4	Datos utilizados .....	13
4.1	Características Landsat 5 .....	13
4.2	Características Landsat 8 .....	14
4.3	Imágenes utilizadas .....	15
5	Metodología.....	16
5.1	Pre-procesado .....	16
5.2	Visualización de sedimentos en suspensión.....	17
5.3	Observación de aguas poco profundas.....	18
5.4	Calculo de marea en el instante de obtención de las imágenes.....	19
5.5	Índice de agua .....	21
5.6	Índice de Vegetación .....	22
6	Análisis de resultados .....	24
6.1	Análisis de los sedimentos que transporta el río .....	24
6.2	Análisis de aguas poco profundas .....	30
6.3	Análisis de las mareas.....	32
6.4	Análisis de índices de agua .....	36
6.5	Análisis de los índices de vegetación.....	42
7	Conclusiones .....	48
	Bibliografía.....	49
	Anexo- Traducción.....	50

## 1 Introducción

Betsiboka, el río más grande de Madagascar (600 km de longitud), es un importante conducto para el transporte de sedimentos erosionados desde las altas tierras centrales de Madagascar.

El río Betsiboka fluye desde la capital de Madagascar (Antananarivo) hasta Mahajanga, una de las seis grandes ciudades de la isla y el segundo puerto más importante para el país. El agua dulce del río Betsiboka se mezcla con el agua salada del canal de Mozambique, en la que el agua salada del mar penetra hacia el interior y se une a la descarga de agua dulce del río. Por otra parte, la alta escorrentía de la estación lluviosa y la dinámica fuerte de los ríos aseguran que el agua dulce prevalezca sobre las influencias marinas.

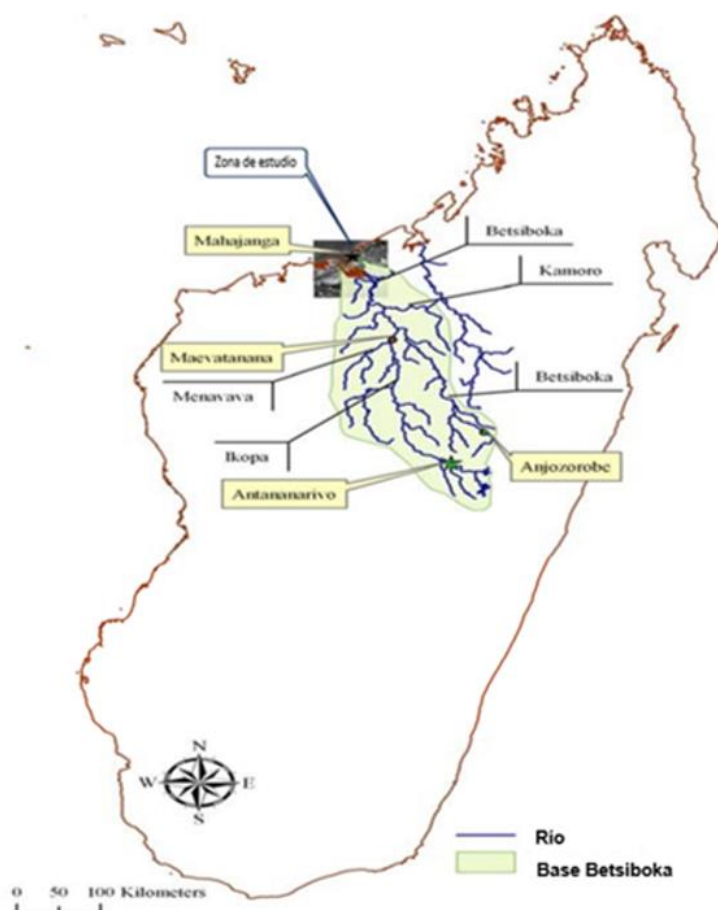


Figura 1. Mapa hidrográfico del estuario de Betsiboka. Fuente: (Raharimahefa & Kusky, 2010).

La cuenca de Betsiboka es muy importante para la agricultura en Madagascar, cubriendo aproximadamente 49.000 Km<sup>2</sup>. El estuario de Betsiboka (Figura 1) tiene muchas fuentes incluyendo el río Ikopa, el río Menavava y el río Kamoro.

Se ha reportado en los últimos treinta años que la profundidad del río Betsiboka en las proximidades al estuario está disminuyendo.

Son varias las causas que provocan esta gran erosión, por ejemplo; los efectos negativos de las actividades humanas, como los incendios forestales, la deforestación y el pastoreo excesivo, que causan la erosión y la deposición fluvial.

El paso regular de las tormentas tropicales provoca cada año inundaciones prolongadas con una duración media de 35 días. La llanura Marovoay es la segunda región más grande de cultivo de arroz en Madagascar.

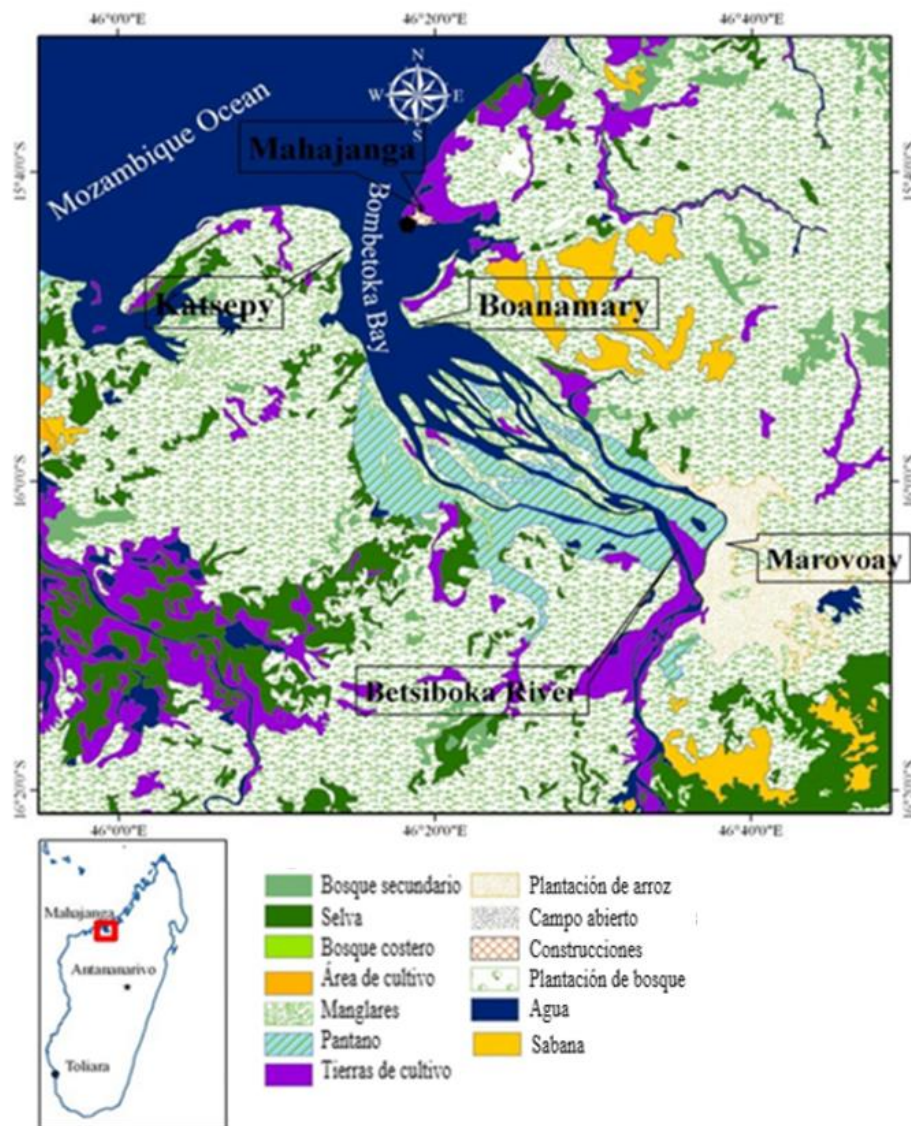


Figura 2. Mapa de usos de suelo en la bahía de Bombetoka. Fuente: (Raharimahefa & Kusky, 2010).

La Bahía de Bombetoka es muy importante en términos de economía, biología y geología. Se encuentran en la zona grandes campos de arroz y piscifactorías de camarones. Respecto a la biología se sitúan, grandes cadenas de manglares que se asocian con numerosos bancos de arena, pequeñas islas con aguas poco profundas en el estuario.

La profundidad del río es relativamente baja (inferior a 5 metros), debido a la deposición de sedimentos rojos llevados por el río Betsiboka. Los sedimentos producidos por *lavakas* (un nombre local para grandes barrancos erosivos) (Figura 3) son la principal fuente de espesor de lodo rojo depositados en la bahía y el estuario. Éstos se erosionan fácilmente debido a que los pastizales no pueden sostener el terreno. Las pérdidas de suelo observadas a lo largo del río Betsiboka han crecido exponencialmente en los últimos treinta años y se encuentran entre las erosiones más grandes registradas en el mundo.

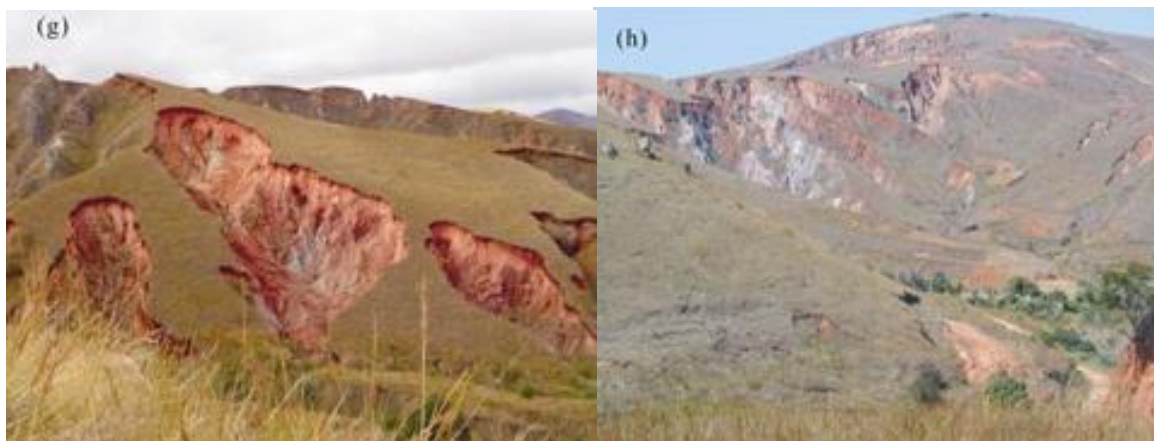


Figura 3. Lavakas. Fuente: (Raharimahefa & Kusky, 2010).

El sedimento en el delta del río Betsiboka y el estuario es el resultado de la erosión tropical que se ha lixiviado del suelo. En su mayoría son compuestos de hierro, dándole a éste su característico tono rojizo.

La deforestación en la parte central de Madagascar ha sido muy activa desde la época colonial y esto acelera la erosión de los suelos. A través de imágenes de satélite se observa como Madagascar está sufriendo a causa del impacto de la deforestación, la erosión tropical y la ignorancia de la explotación incontrolada de los recursos naturales.

La agricultura es la principal actividad económica en Madagascar. Los campos de arroz cercanos al estuario están afectados por gruesas capas de lodo que hacen perder parte de la cosecha ( Figura 4).



Figura 4. Campo de arroz con capa de lodo. Fuente: (Raharimahefa & Kusky, 2010).



Actualmente, un pequeño porcentaje de la superficie de la isla es apto para la agricultura debido a la abundancia de lavakas. Estos barrancos formados por la erosión se están convirtiendo rápidamente en una característica geomorfológica de Madagascar. En la Figura 5 se observa los flujos de lodo que se encuentran en las proximidades de lavakas.



*Figura 5. Flujos de lodo. Fuente: (Raharimahefa & Kusky, 2010).*

La tala y quema de bosques para la agricultura y la producción de carbón siguen activas en muchas localidades de la isla, lo que contribuye a la formación de nuevas lavakas. La tala de los bosques nativos hace que aumente en gran medida la erosión del suelo, también contribuye en menor medida, la tectónica activa de Madagascar. Además, el clima y las condiciones atmosféricas en Madagascar aceleran la erosión.

Las lluvias anuales y tifones facilitan el transporte de sedimentos de las tierras altas de la costa de Madagascar, especialmente de las zonas que fueron recientemente deforestadas.

La bahía Bombetoka es un área importante para el estudio de las tasas de erosión y sedimentos activos y un punto crítico para el análisis de los cambios ambientales. Es un estuario poco profundo de sedimentación marina, en el cual, el delta está creciendo ya que la tasa de suministro de sedimentos del río Betsiboka es mayor que la tasa de dispersión de sedimentos por las olas y las mareas.



## 2 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es el análisis y comprensión de la evolución de la bahía de Bombetoka entre los años 1998 y 2016, utilizando técnicas de detección de cambios basadas en las imágenes proporcionadas por los satélites Landsat 5 y Landsat 8.

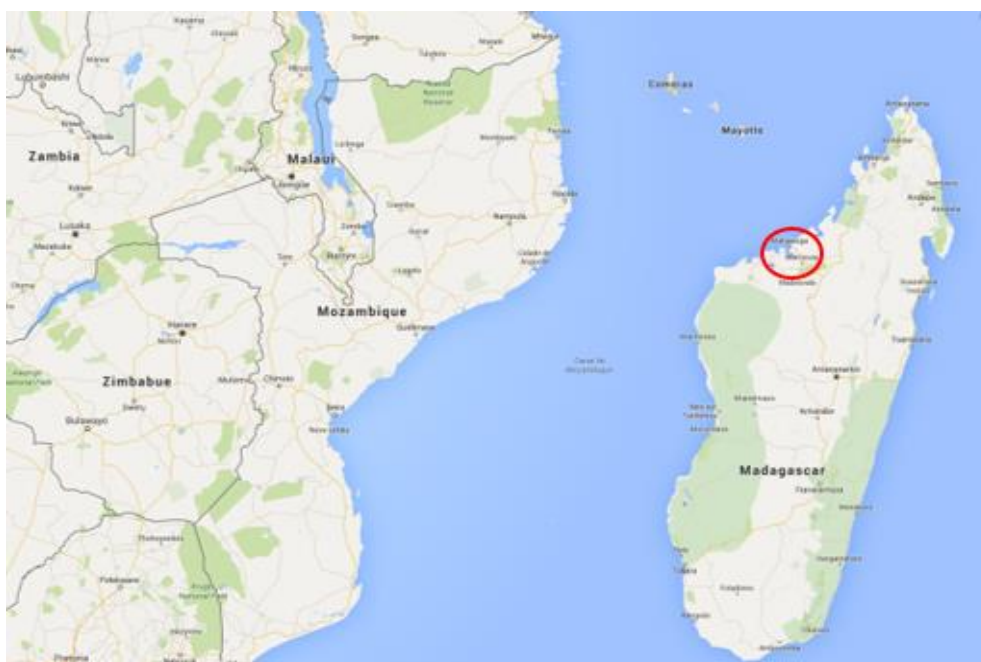
Para cumplir el objetivo principal se necesitan los siguientes objetivos secundarios:

- Detectar los sedimentos en suspensión que transporta el agua del río Bombetoka en cada imagen y observar hasta donde penetran en el océano.
- Observar la superficie de aguas poco profundas en la bahía de Bombetoka.
- Calcular, identificar y comparar la altura de marea en el instante de captura de la imagen.
- Analizar los índices de agua en cada una de las imágenes y comparar la superficie de agua y tierra.
- Analizar el índice de vegetación en cada una de las imágenes y observar la evolución.

### 3 Área de estudio

Madagascar es la isla más grande del continente africano y se encuentra rodeada íntegramente por el océano Índico. En la costa noroeste de Madagascar, las aguas saladas del Canal de Mozambique penetran hacia el interior para unirse a la salida de agua dulce del río Betsiboka, formando la Bahía de Bombetoka situada cerca de la ciudad de Mahajanga.

El área de estudio se centra en la bahía de Bombetoka con una superficie de 300.600 ha, sus coordenadas son 15°49'60"S y 46°16'60"E. El área de estudio tiene unas coordenadas que van desde 15°40'S a 16°10'S de latitud y de 46°10'E a 46°50'E de longitud.



*Figura 6. Situación de la zona de estudio Fuente: Google Earth.*

## 4 Datos utilizados

Las imágenes utilizadas se han obtenido de los satélites Landsat 5 y Landsat 8. El satélite Landsat 5 se lanzó en el año 1984 y estuvo operativo hasta 2011, mientras que el Landsat 8 se lanzó en 2013 y actualmente aún está operativo. Ambos pertenecen al Proyecto Landsat de la agencia espacial americana (NASA).

### 4.1 Características Landsat 5

Landsat 5 es un satélite de observación que fue lanzado el 1 de marzo de 1984 y estuvo operativo hasta noviembre de 2011. Equipado con el sensor Thematic Mapper (TM) de 7 bandas, donde la banda 6 pertenece al infrarrojo térmico y un escáner multispectral MSS de 4 bandas.

Orbitaba polarmente con una altura de 705 km y con una inclinación de 98,2°. Su tiempo de revisita era de 16 días en el cual obtenía imágenes de 170 km respecto al eje norte-sur y 183 km respecto al eje este-oeste.

Nº de Banda	Longitud de onda (µm)	Resolución espacial
1- Blue	0,45 - 0,52	30 m
2- Green	0,52 - 0,6	30 m
3- Red	0,63 - 0,69	30 m
4- NIR	0,76 - 0,9	30 m
5- SWIR 1	1,55 - 1,75	30 m
6- TIR	10,41 - 12,5	120 m
7- SWIR2	2,08 - 2,35	30 m

*Tabla 1. Características del Sensor Thematic Mapper (TM) del satélite Landsat 5.*

## 4.2 Características Landsat 8

Equipado con el sensor Operational Land Imager (OLI), el satélite Landsat 8 fue lanzado el 11 de febrero de 2013 y aún sigue operativo. Su sensor consta de 9 bandas con una resolución de 30 metros, excepto la banda del Pancromático que tiene una resolución de 15 metros. También incorpora el Thermal Infrared Sensor (TIRS) que tiene dos bandas de infrarrojo térmico.

La banda 1 capta la reflexión entre violeta y azul oscuro, sus principales utilidades, la formación de imágenes en aguas poco profundas y seguimiento de partículas pequeñas (humo, polvo...). Las bandas 2, 3 y 4 corresponden al azul, verde y rojo mientras que la banda 5 corresponde al infrarrojo cercano. Las bandas 6 y 7 son infrarrojo de onda corta mientras que la banda 8 capta la reflexión del Pancromático. La banda 9 detecta la reflexión de las nubes altas formadas por cristales de hielo (Cirrus). Las bandas 10 y 11, son las del TIRS que captan la reflexión del infrarrojo térmico.

Tiene las mismas características en órbita que Landsat 5.

Nº de Banda	Longitud de onda ( $\mu\text{m}$ )	Resolución espacial
1- Coastal / Aerosol	0,433 - 0,453	30 m
2- Blue	0,45 - 0,515	30 m
3- Green	0,525 - 0,6	30 m
4- Red	0,63 - 0,68	30 m
5- NIR	0,845 - 0,885	30 m
6- SWIR 1	1,56 - 1,66	30 m
7- SWIR 2	2,1 - 2,3	30 m
8- Panchromatic	0,5 - 0,68	15 m
9- Cirrus	1,36 - 1,39	30 m
10- TIRS 1	10,6 - 11,2	100 m
11- TIRS 2	11,5 - 12,5	100 m

*Tabla 2. Características del sensor OLI y TIRS del satélite Landsat 8.*

### **4.3 Imágenes utilizadas**

La descarga de las imágenes se hace a través de la página web del USGS (United States Geological Survey) mediante el software de visualización GLOVIS (Global Visualization Viewer). Estas imágenes están clasificadas según la fecha de realización, la pasada (Path) y la fila (Row).

Para poder realizar un buen estudio es necesario que la zona de trabajo esté libre de nubes. La imagen más antigua del estudio es de abril de 1989 y la más reciente data de marzo de 2016, obteniendo un estudio evolutivo de 27 años.

Path 160– Row 071		
Satélite	ID	Fecha
LANDSAT 5	LST51600711989101JSA00	11/04/1989
	LST51600711995086JSA00	27/03/1995
	LST51600712000084JSA00	24/03/2000
	LST51600712000132JSA00	11/05/2000
	LST51600712006100JSA00	10/04/2006
	LST51600712010095JSA00	05/04/2010
LANDSAT 8	LC81600712013119LGN01	29/04/2013
	LC81600712016064LGN00	04/03/2016

*Tabla 3. Imágenes utilizadas del Landsat 5 y Landsat 8.*

## 5 Metodología

El software utilizado para el desarrollo del TFG ha sido el programa Miramón. Miramón es un Sistema de Información Geográfica (SIG) y software de teledetección. Permite la visualización, consulta, edición y análisis de capas raster, capas vectoriales y capas WMS.

### 5.1 Pre-procesado

Las imágenes descargadas se obtienen en formato TIFF, pero para trabajar con el programa Miramon se necesita transformarlas en formato .IMG propio del software Miramon.

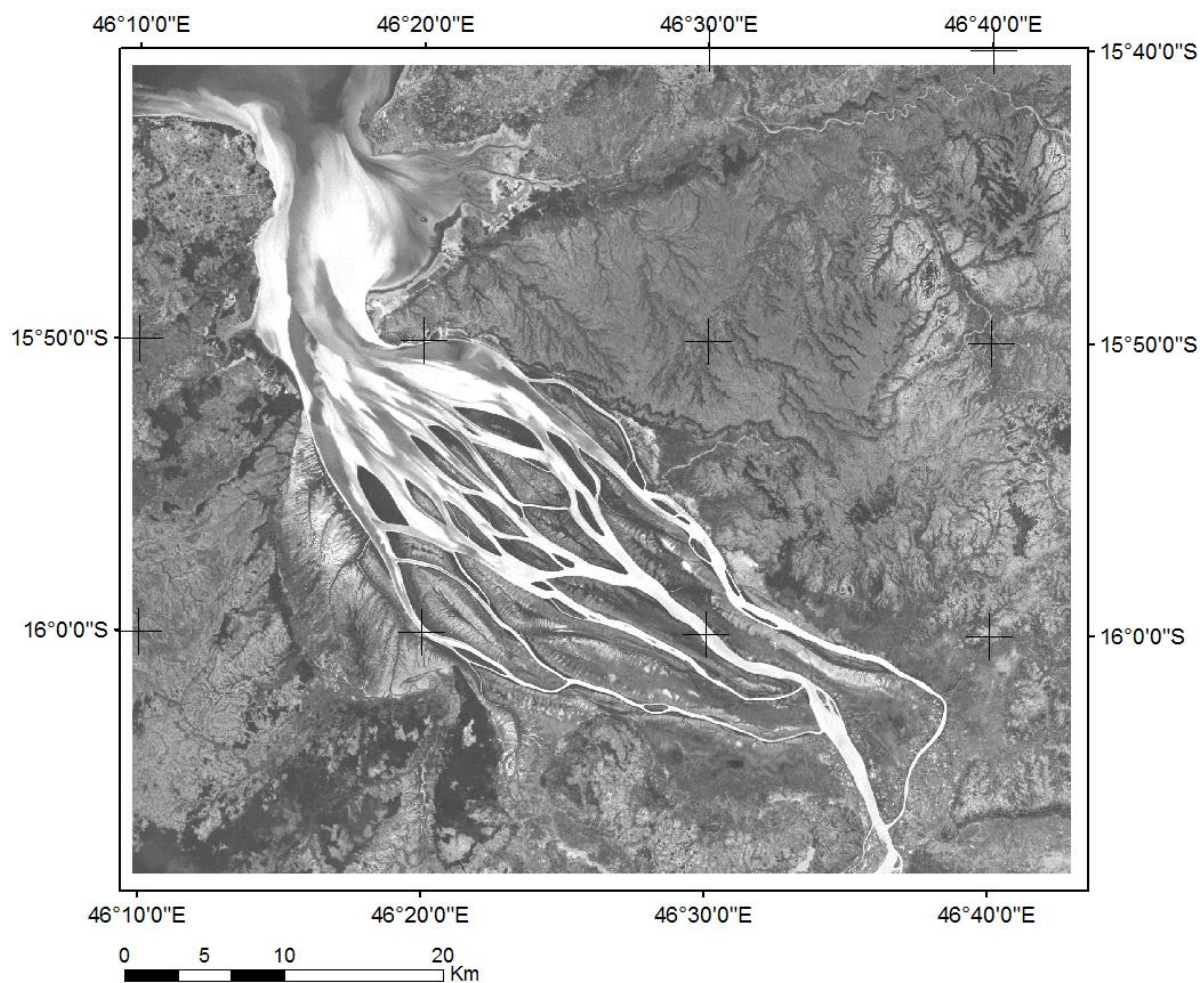
Se ha aplicado un recorte sobre la zona de interés en las imágenes descargadas con la finalidad de poder trabajar de una manera más homogénea.

El sistema de referencia cartográfico de todas las imágenes es WGS84 en proyección UTM huso 38 hemisferio Norte.

Previo a procesar las imágenes se ha efectuado una corrección radiométrica a cada una de ellas, y se han corregido respecto a la imagen del 11/04/1989.

## 5.2 Visualización de sedimentos en suspensión

Para visualizar los sedimentos en suspensión se ha obtenido una nueva banda. Esta nueva banda se consigue mediante la división de la banda del rojo entre la banda azul. En la Figura 7 se muestra el resultado de la división de la banda 3 entre la banda 1. Se observa en blanco los sedimentos en suspensión que transporta el río. Se puede observar en la Figura 7 las zonas del río que aportan gran cantidad de sedimentos en suspensión respecto a las zonas que no las aportan.



*Figura 7. Imagen del año 1989, muestra los sedimentos en suspensión.*



### 5.3 Observación de aguas poco profundas

La banda 1 del satélite Landsat 8 está situada en la franja del espectro electromagnético entre 0,433 - 0,453  $\mu\text{m}$  que permite la visualización del fondo marino.

La identificación de aguas poco profundas se ha realizado mediante la banda Coastal (banda 1) del Landsat 8. La banda 1 detecta azules poco profundos y violetas. Su principal uso es; la formación de imágenes en aguas poco profundas y el seguimiento de partículas pequeñas como el humo o el polvo.

Debido a que Landsat 8 se lanzó en el año 2013 no hay mucho margen de estudio, pero nos ayudara saber si hay aguas poco profundas.

En la Figura 8 se muestra el trazado que deja la corriente del rio en su fondo lo que nos indica que tiene poca profundidad.

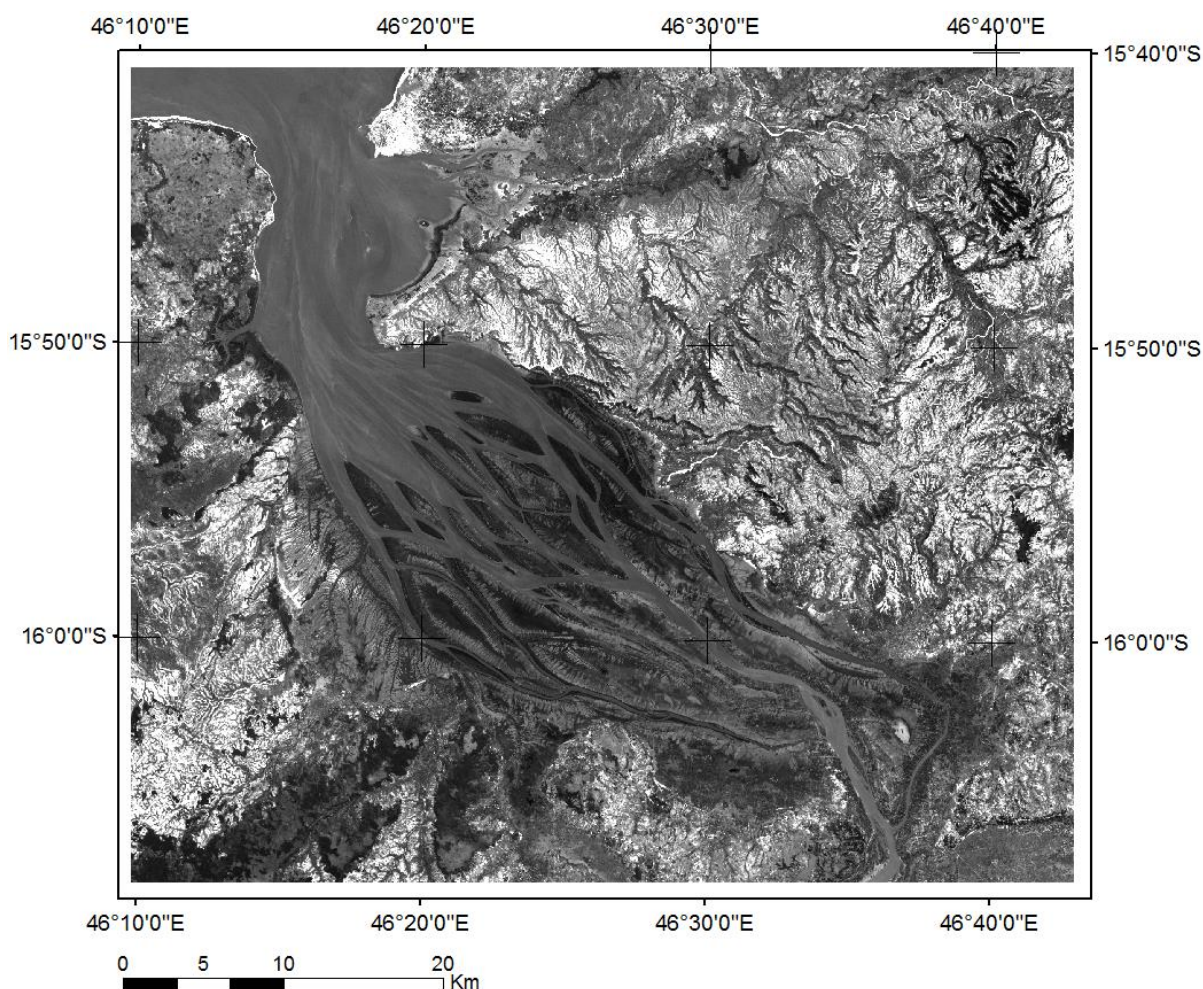


Figura 8. Imagen del año 2013, muestra las aguas poco profundas.

#### 5.4 Cálculo de marea en el instante de obtención de las imágenes

El cálculo de las mareas se ha realizado para poder saber en el instante de obtención de la imagen la situación de la marea. Determinar que superficie de la bahía aumenta por los sedimentos que transporta el río y no por las mareas es vital.

Las mareas tienen un ciclo de 24 horas y 50 minutos. Dentro de este ciclo hay dos mareas altas y dos mareas bajas, que se repiten consecutivamente cada 6 horas y 12.5 minutos. Es decir que cada 6 horas y 12.5 minutos hay cambio de marea.

Para realizar el cálculo es necesario tener la fecha y hora de obtención de la imagen. También es necesario tener una fecha y hora exacta de una de las mareas altas o bajas. Por desgracia, no ha sido posible encontrar una tabla de mareas para todo el periodo de estudio y se han calculado a partir de un valor de referencia que se ha obtenido de una tabla de mareas.

Un ejemplo de cálculo sería el siguiente, para calcular la altura de marea en la imagen obtenida con fecha 10/04/2006, se ha tomado como valor de referencia la marea alta del día 10/04/2010 que se produce a las 12:25 h.:

El primer paso es calcular la diferencia de horas que hay de una fecha a otra.

$$\begin{aligned} \text{Diferencia de horas} &= \text{fecha}_2 - \text{fecha}_1 = (1460 \text{ días} + 1 \text{ día por año bisiesto}) \times 24 \text{ horas} \\ &= 35064 \text{ horas} \end{aligned}$$

El cálculo es 365 días por 4 años de diferencia más un día por año bisiesto, da 1461 días. Los días se multiplican por 24 horas y se obtiene la diferencia de horas que hay de una fecha a otra que son 35064 horas.

El siguiente paso es calcular los ciclos de diferencia que hay entre las dos fechas:

$$\begin{aligned} \text{Diferencia de ciclos de marea entre fechas} &= \frac{\text{Diferencia de horas}}{\text{Ciclo de marea}} = \frac{35064 \text{ h}}{24.833 \text{ ciclo/h}} = \\ &1411.97315 \text{ Ciclos de marea} \end{aligned}$$

Si el resultado fuera un número exacto, entonces habría marea alta a la misma hora que en la imagen de referencia. Los decimales del resultado es la variación horaria que hay de una fecha a otra para que sean en las dos, marea alta.

El tercer paso es calcular la hora en la que hay marea alta el día diez de abril del año dos mil seis:

$$\begin{aligned} \text{Marea alta}_{2006} &= \text{hora marea alta}_{2010} + (1 - \text{Residuo d. ciclo de marea}) \times \text{ciclo de marea} \\ &= 12.41666h + (1 - 0.97315 \text{ ciclos}) \times 24.833 \frac{h}{\text{ciclos}} \\ &= 12.41666 h + 0.6667 h = 13.0834 h = 13 h 05 min \end{aligned}$$

La hora en la que hay marea alta el día diez de abril del año dos mil seis es a las 13:05. La imagen se realizó a las 06:49, se le resta el tiempo que transcurre entre marea alta y baja.

$$\text{Marea baja}_{2006} = 13,0834 - 6,2083 = 6,8751h = 6h 53 min$$

Este proceso se realiza para todas las imágenes y así se obtiene:

Fecha de la imagen	Hora de obtencion de la imagen	Hora de marea alta o baja
11/04/1989	06:26:52	07:01 marea alta
27/03/1995	06:07:27	04:38 marea baja
24/03/2000	06:31:54	08:15 marea alta
11/05/2000	06:37:31	07:31 marea baja
10/04/2006	06:49:19	06:53 marea baja
05/04/2010	06:48:38	07:30 marea alta
04/03/2016	06:57:37	06:25 marea baja

*Tabla 4. Resultados del cálculo de mareas.*

## 5.5 Índice de agua

El índice de agua se ha realizado para ver la variación de superficie de tierra y agua a lo largo de los años y saber dónde se acumulan los sedimentos que transporta el río. Pero las mareas juegan un papel importante en este índice de agua, sobretodo en la línea de costa y los bancos de arena. El índice de agua ayuda a entender que sucede con los sedimentos que arrastra el río Bombetoka.

El índice de agua se realiza mediante el programa Miramón, utilizando la Calculadora Raster se hace una normalización entre la banda 2 (banda verde) y la banda 5 (infrarrojo cercano).

Se ha utilizado la formula  $IA = \frac{B2-B5}{B2+B5}$  para la obtencion del índice de agua. En la Figura 9 se muestra un índice de agua del año 1989 en la cual se distingue perfectamente el agua. El río, el estuario y los pantanos cercanos se ven de color azul.

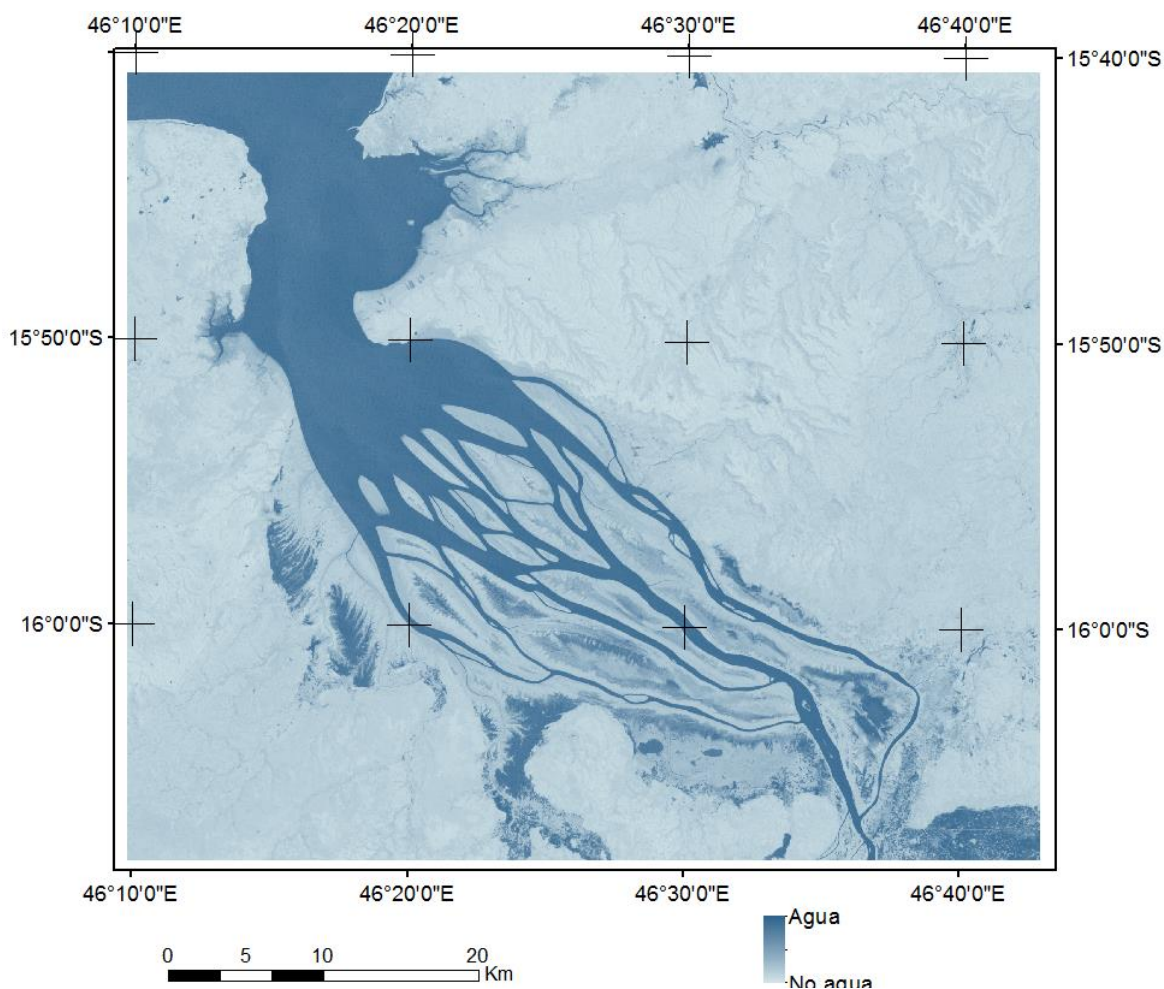


Figura 9. Imagen de 1989, muestra el índice de agua.

## 5.6 Índice de Vegetación

Los índices de vegetación son combinaciones de las bandas espectrales, principalmente de las bandas del rojo y del infrarrojo, registradas por los satélites de teledetección, cuya función es realzar la vegetación en función de su respuesta espectral y atenuar los detalles de otros elementos como el suelo, la iluminación, etc...

Los índices de vegetación, son imágenes calculadas a partir de operaciones algebraicas entre distintas bandas espectrales. El resultado de estas operaciones permite obtener una nueva imagen donde se destacan gráficamente determinados píxeles relacionados con parámetros de las coberturas vegetales.

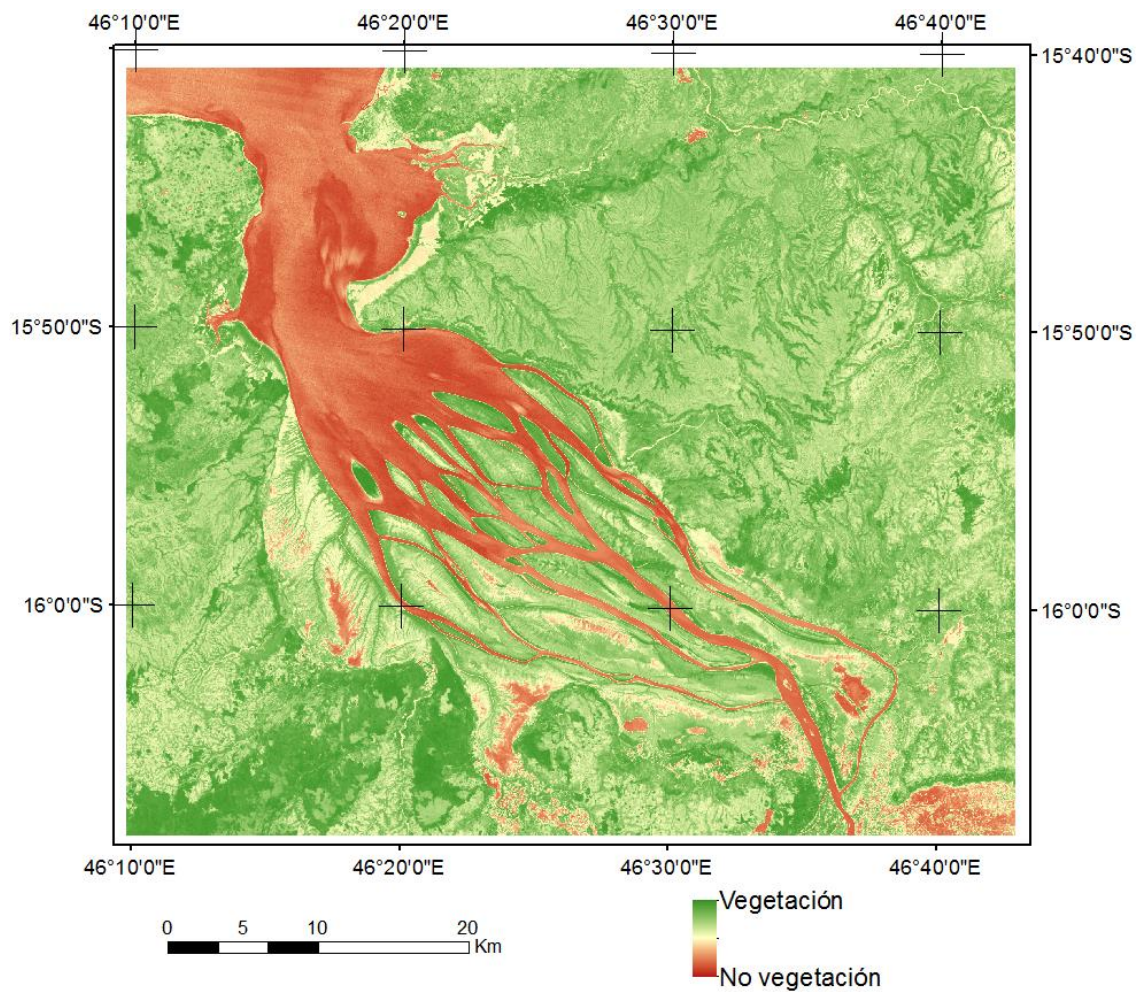
En este proyecto se ha utilizado para el cálculo del índice de vegetación el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), que es el índice de vegetación más utilizado.

El NDVI es una combinación entre la banda de infrarrojo cercano (banda 4) y la banda del rojo (banda 3). En estas bandas la vegetación aparece muy diferente en la longitud de onda visible y la de infrarrojo cercano.

La fórmula del  $NDVI = \frac{B4-B3}{B4+B3}$ , hace que el resultado del valor de los píxeles siempre oscile en un número que va entre -1 y 1, situándose la vegetación a partir de los valores superiores a 0,10.



En la Figura 10 se muestra el índice de vegetación de 1989 en el cual aparece de color verde la vegetación y de color rojo lo que no es vegetación.



*Figura 10. Imagen del año 1989, muestra el índice de vegetación.*

## 6 Análisis de resultados

### 6.1 Análisis de los sedimentos que transporta el río

En estas imágenes se observa la gran cantidad de sedimentos que transporta el río. Los sedimentos se muestran con una gama de color amarillo-naranja. Para la visualización de los sedimentos se ha utilizado una combinación de bandas RGB de 3/1,2,1.

En la Figura 11 se observa poca cantidad de sedimentos en suspensión. Estos sedimentos se acumulan en los bancos de arena y en los laterales de la bahía.

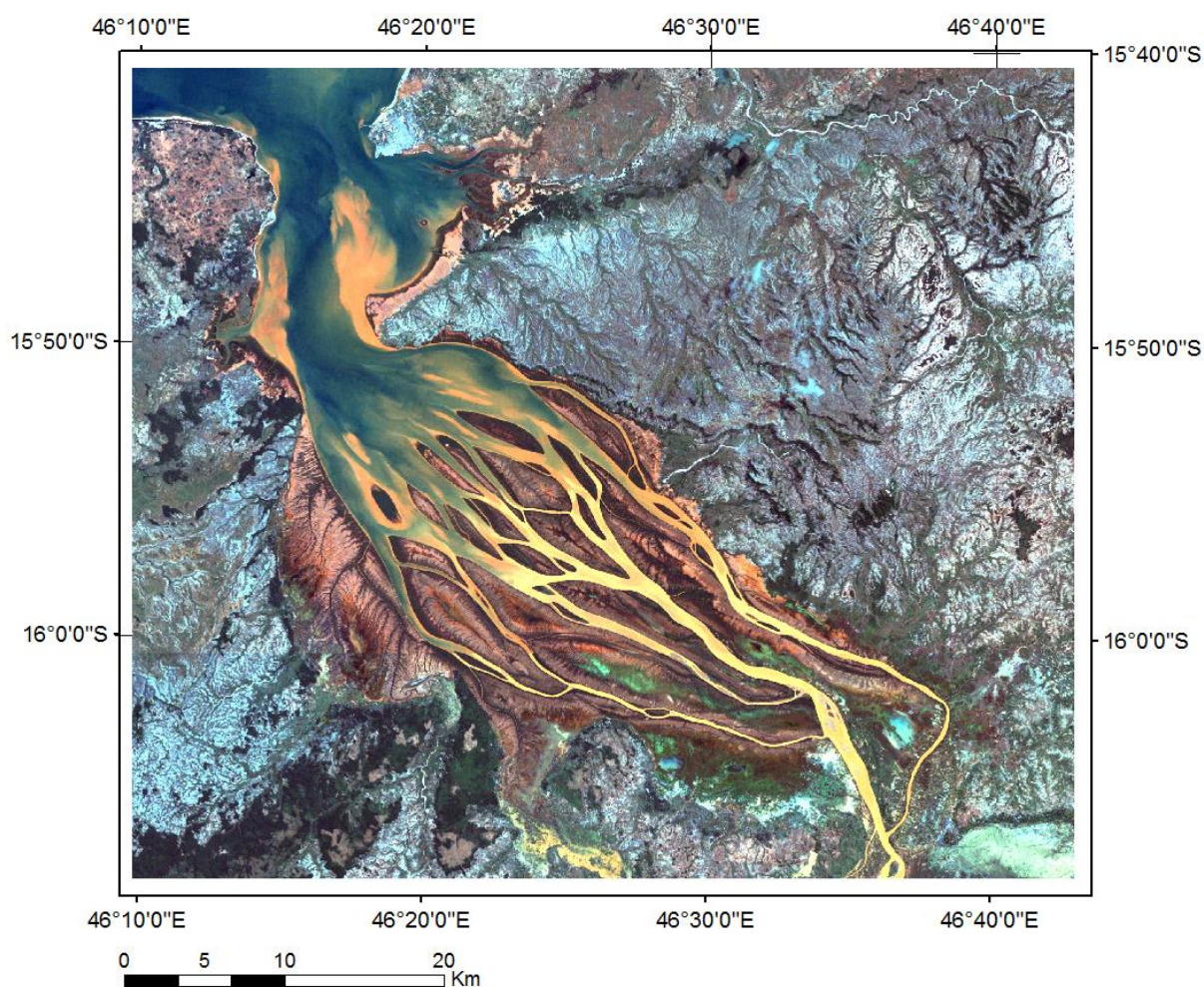


Figura 11. Imagen del año 1989, muestra los sedimentos en suspensión.



En la siguiente imagen (Figura 12), el río apenas transporta sedimentos. Los pocos que transporta son causados por la marea baja por eso se acumulan en las zonas costeras.

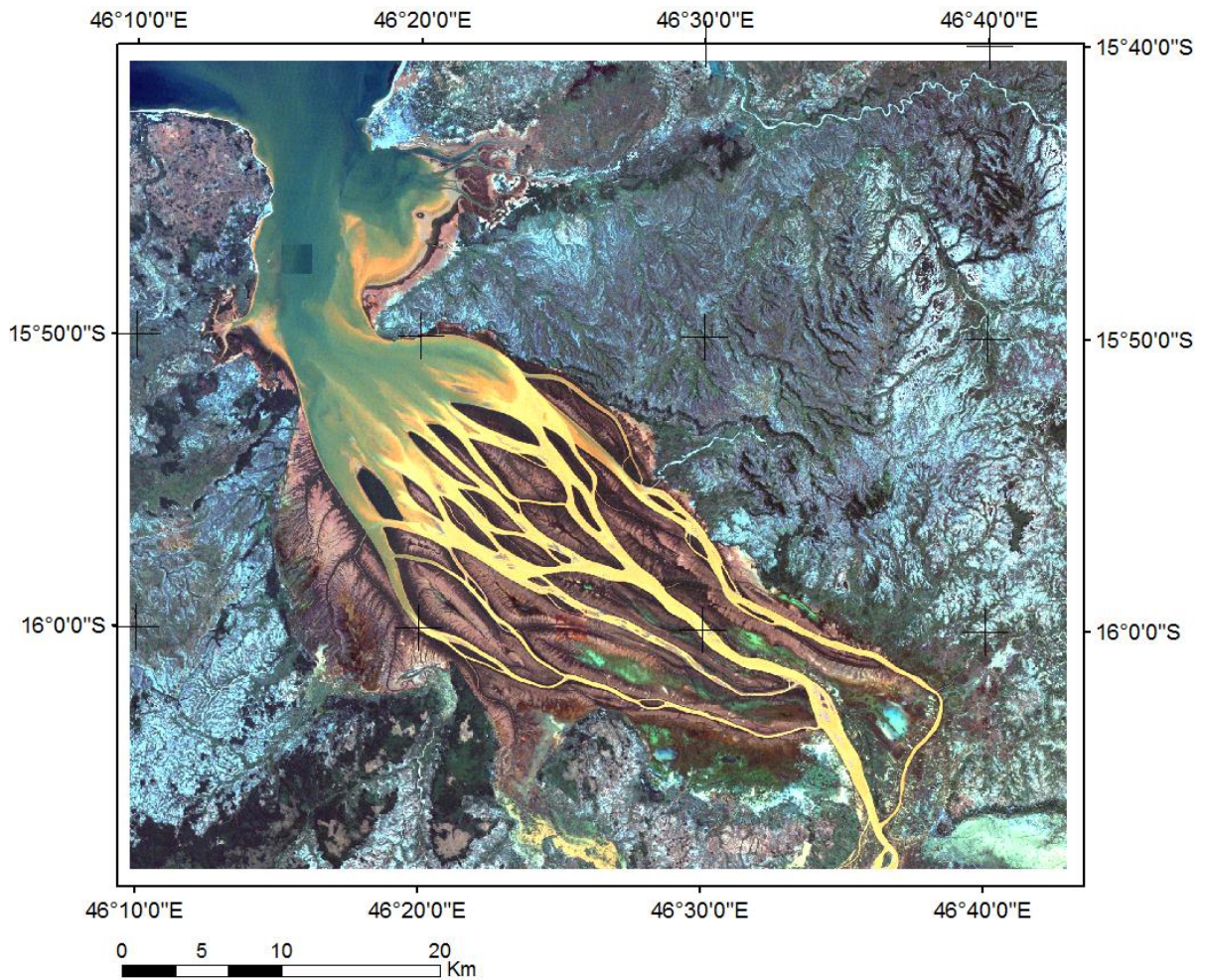
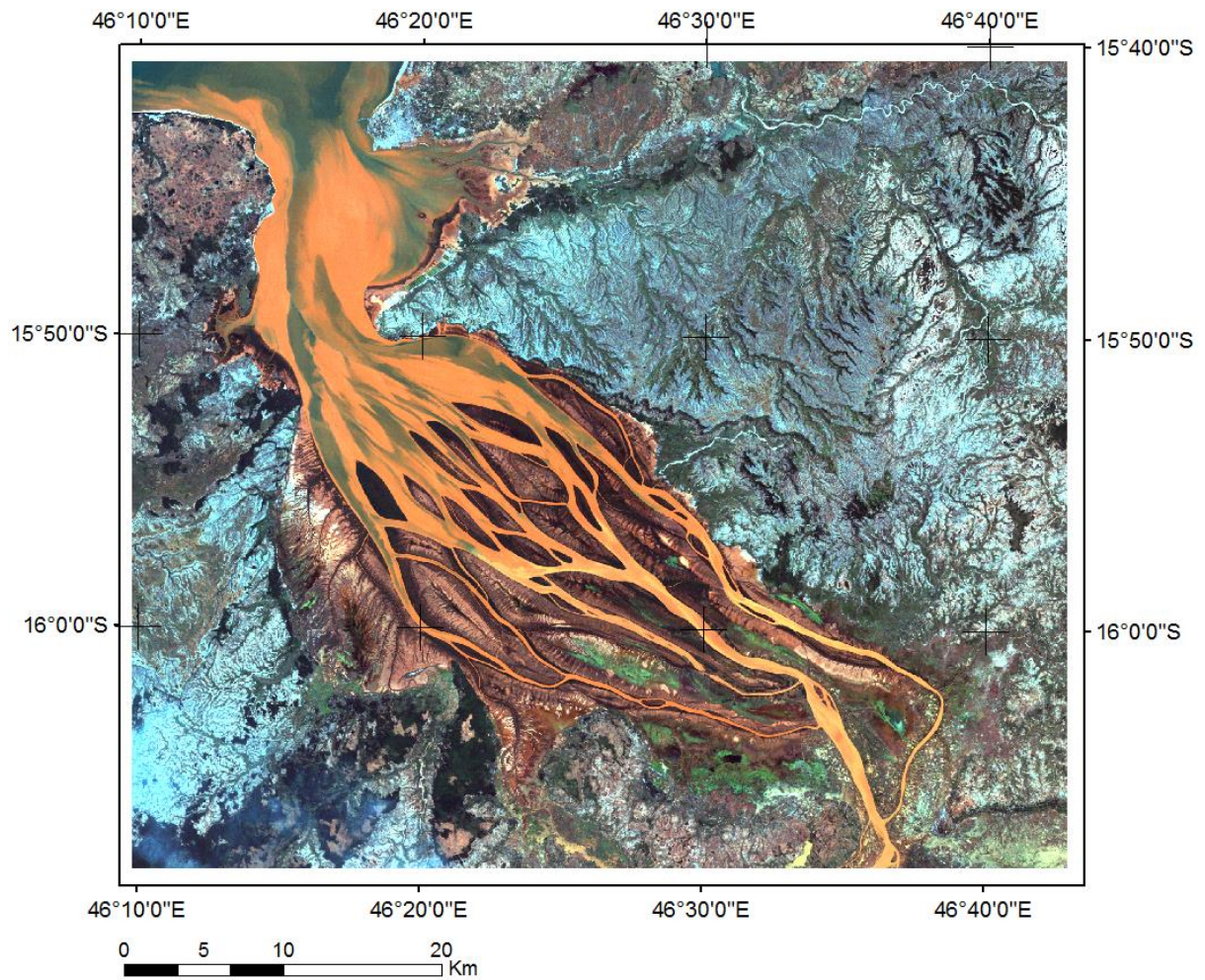


Figura 12. Imagen del año 1995, muestra los sedimentos en suspensión.

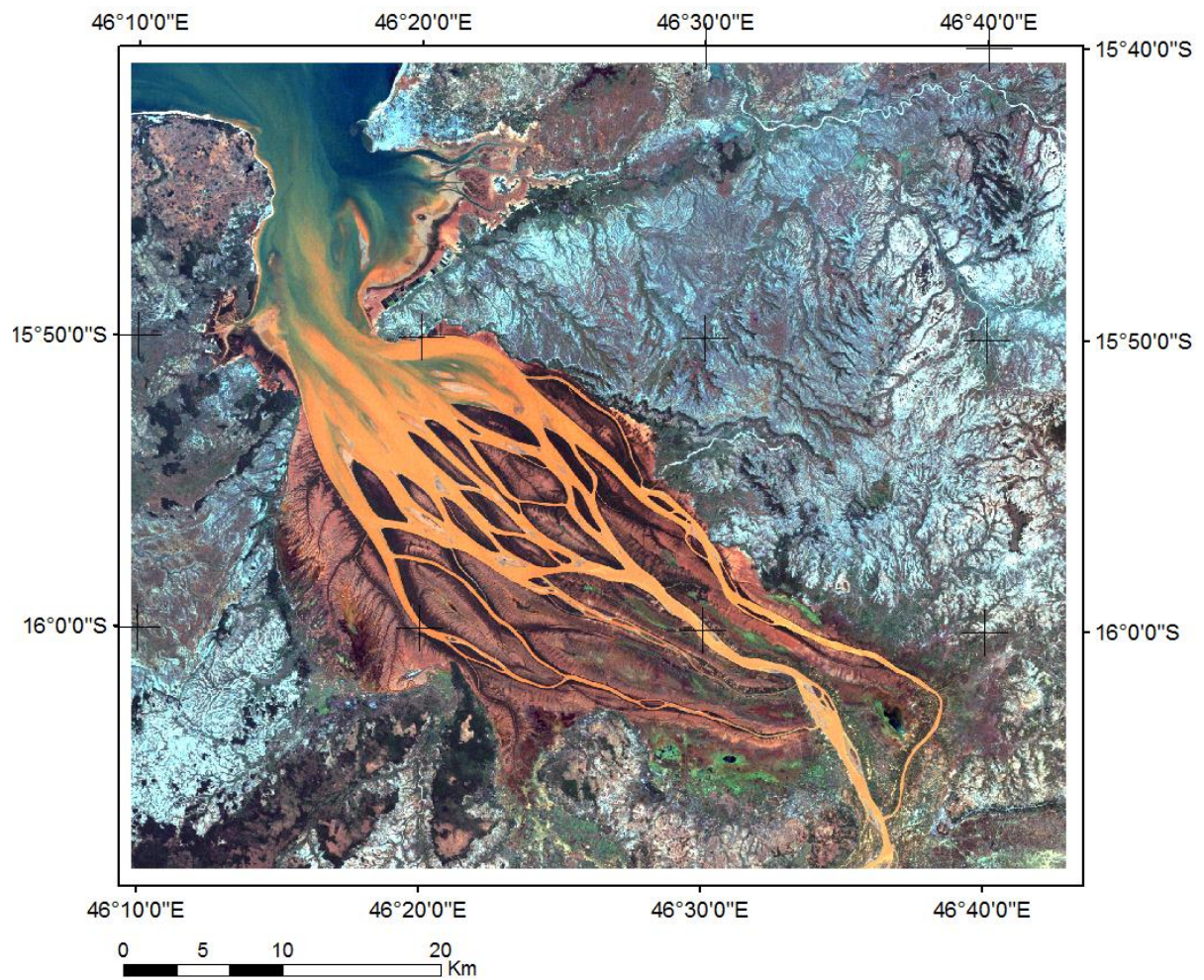
En la Figura 13 se observa con una tonalidad rojiza una gran cantidad de sedimentos que transporta el río.



*Figura 13. Imagen del año 2000, muestra los sedimentos en suspensión.*

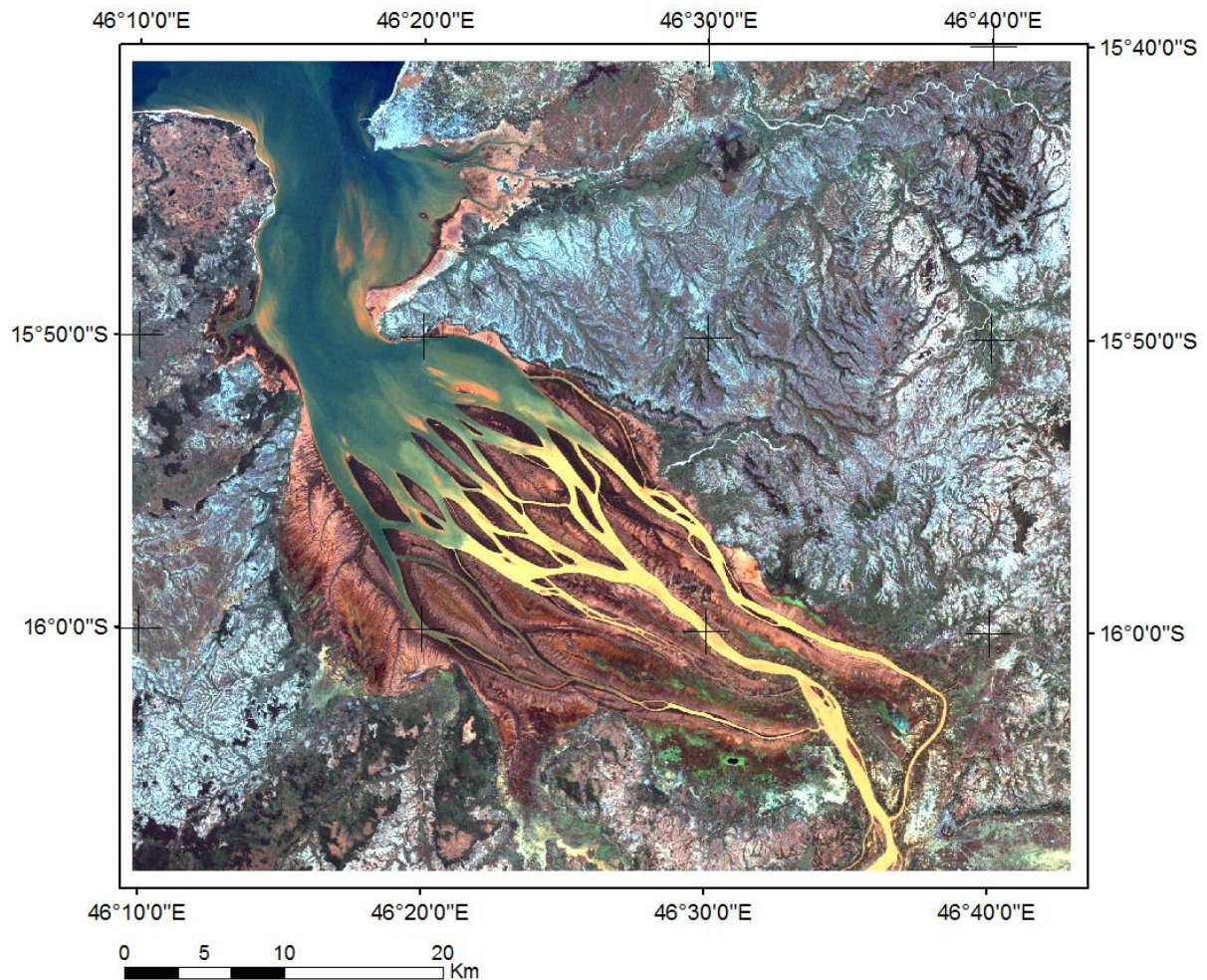


La Figura 14 es una imagen con marea baja creciente y una gran cantidad de sedimentos en suspensión que se estancan en el estuario debido a la disminución del caudal.



*Figura 14. Imagen del año 2006, muestra los sedimentos en suspensión.*

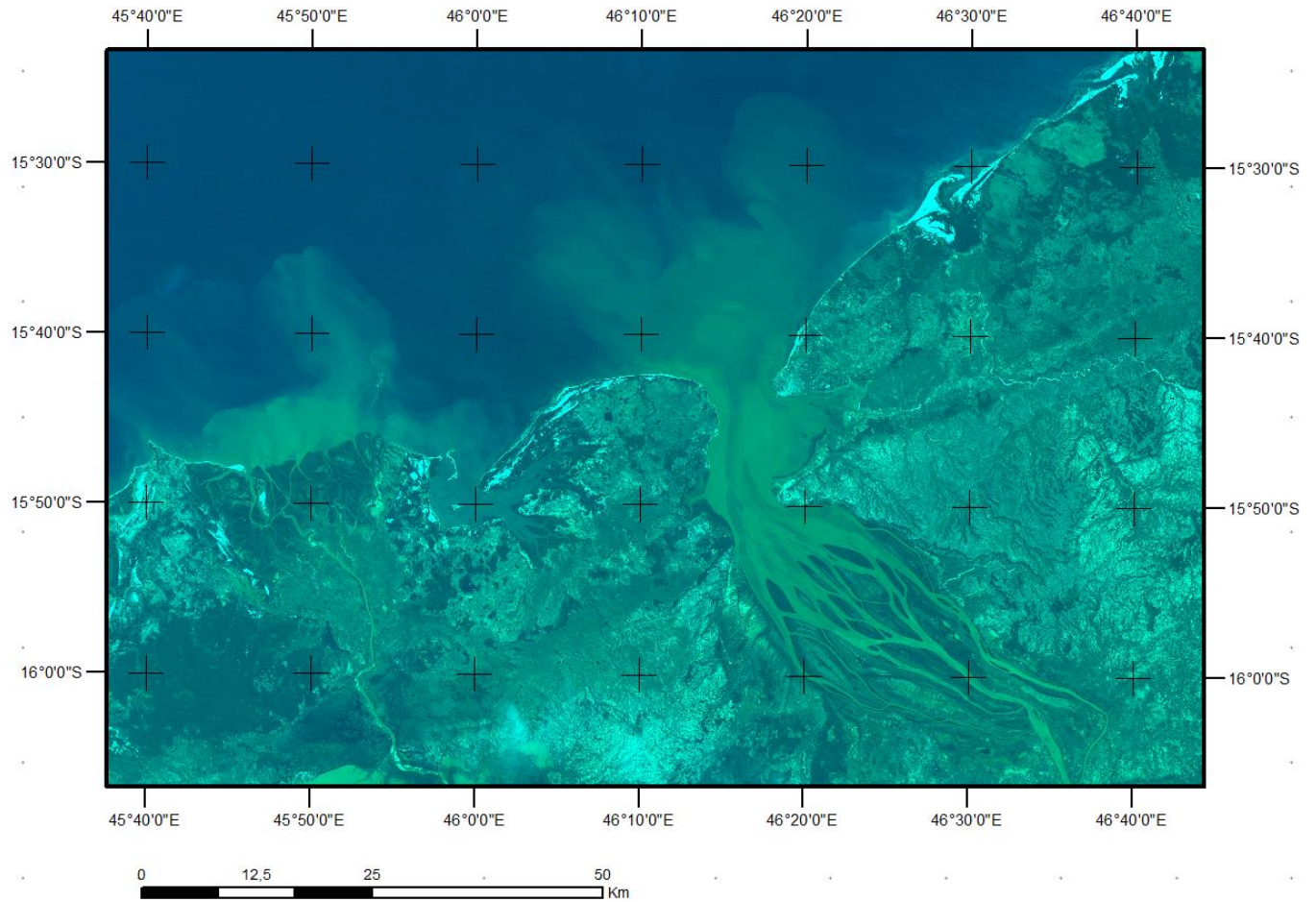
En la Figura 15 no se observan apenas sedimentos en suspensión y los pocos que se muestran son causados por la marea baja. Esta imagen es buena para observar aguas poco profundas.



*Figura 15. Imagen del año 2010, muestra los sedimentos en suspensión.*



La Figura 16 se muestra una imagen más extensa de la zona de estudio para observar cómo se mezclan los sedimentos con el agua del océano, llegando a penetrar hasta 30 km.

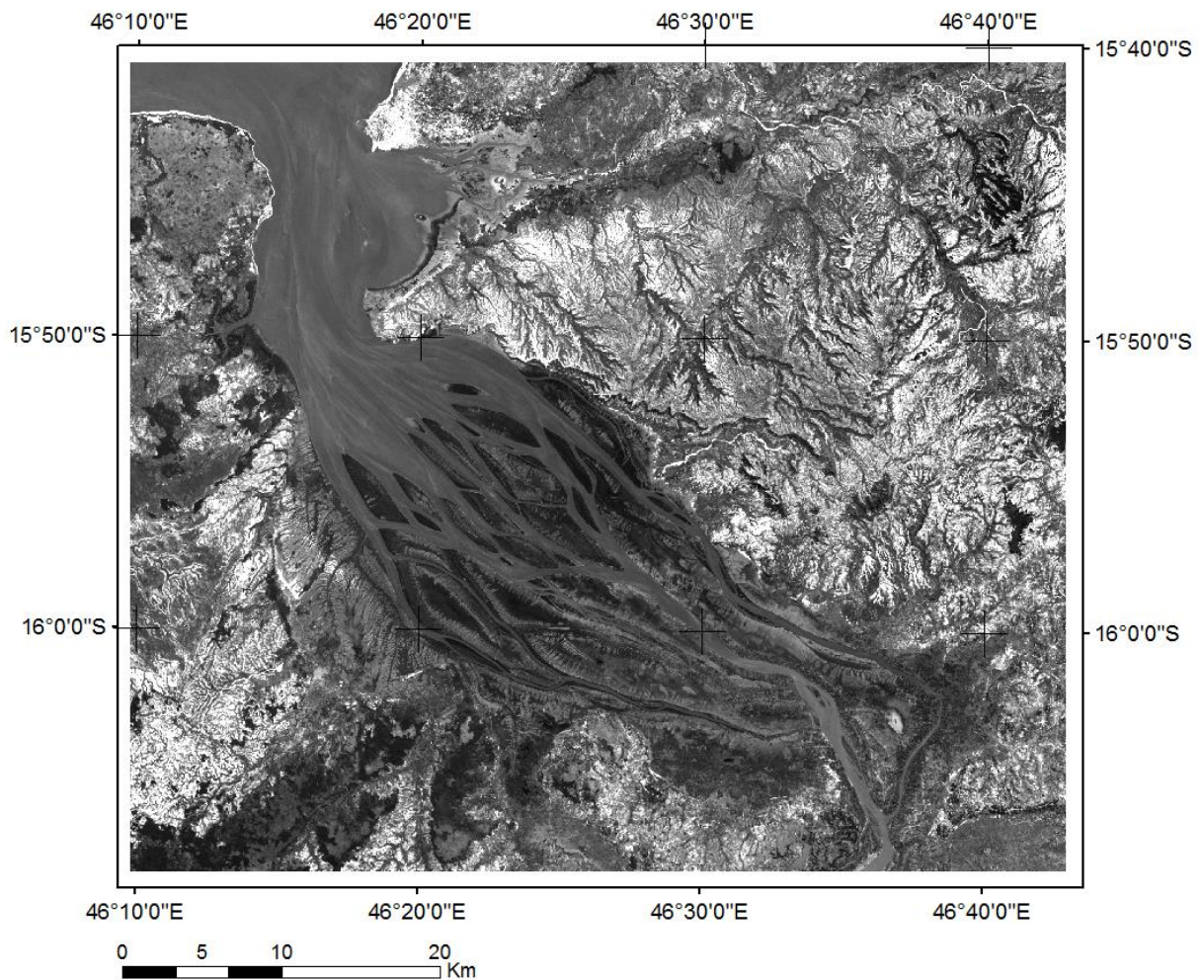


*Figura 16. Imagen del año 2000, se muestra los sedimentos en suspensión.*

## 6.2 Análisis de aguas poco profundas

Las aguas poco profundas son detectadas por la banda 1 de Landsat 8. Se ha comparado dos imágenes de diferentes años para poder determinar si hay aguas poco profundas y en ese caso poder observar si ha disminuido la profundidad aumentado la superficie etc....

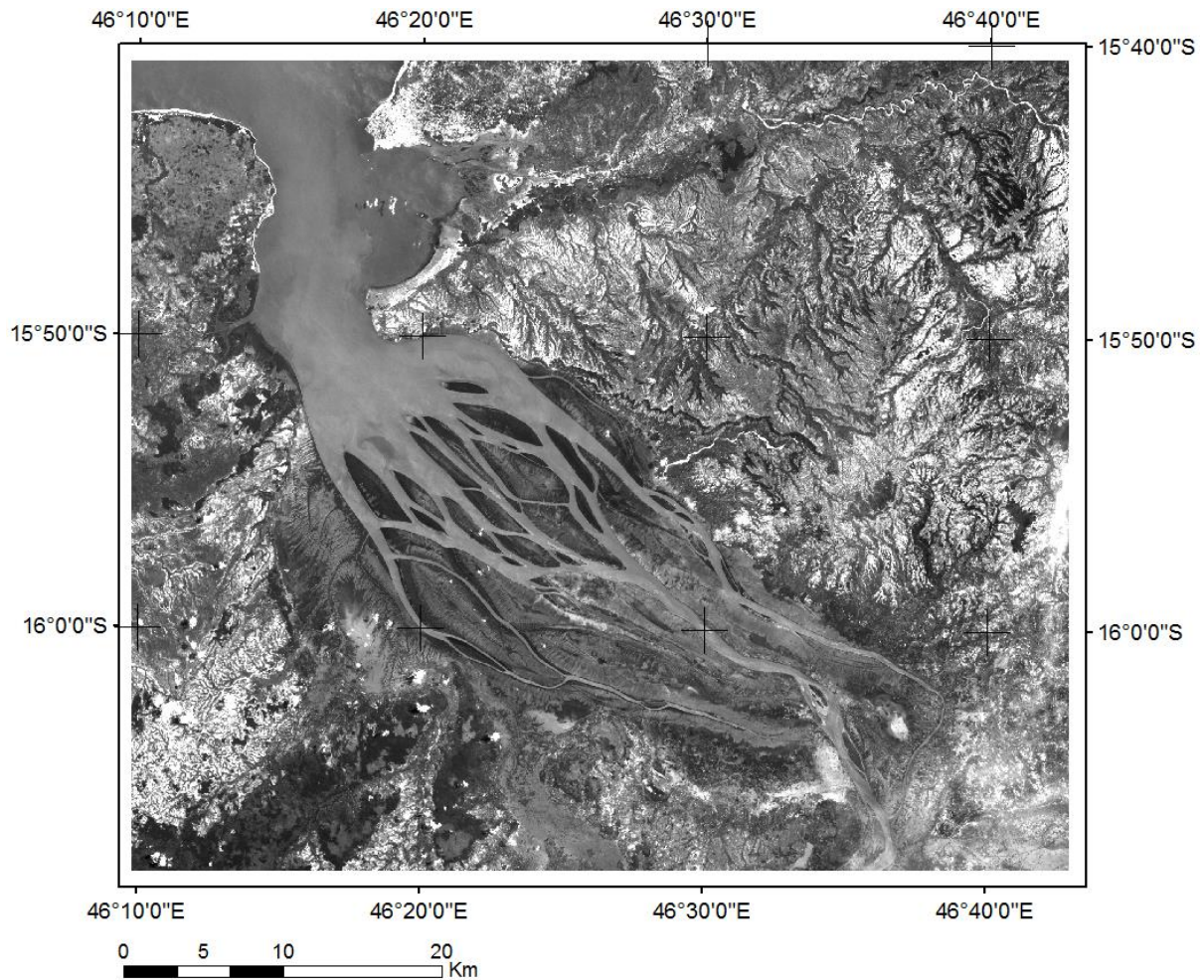
En la Figura 17 se muestran zonas con poca profundidad ya que se puede ver el trazado que deja la corriente en el fondo del agua.



*Figura 17. Imagen del año 2013, muestra las zonas de aguas poco profundas.*



En la Figura 18 no se muestra el fondo del río debido a las partículas en suspensión que hay. Se podía tener alguna duda respecto a la Figura 17 si eran aguas poco profundas o si eran sedimentos en suspensión. La Figura 18 aclara lo que son sedimentos en suspensión.

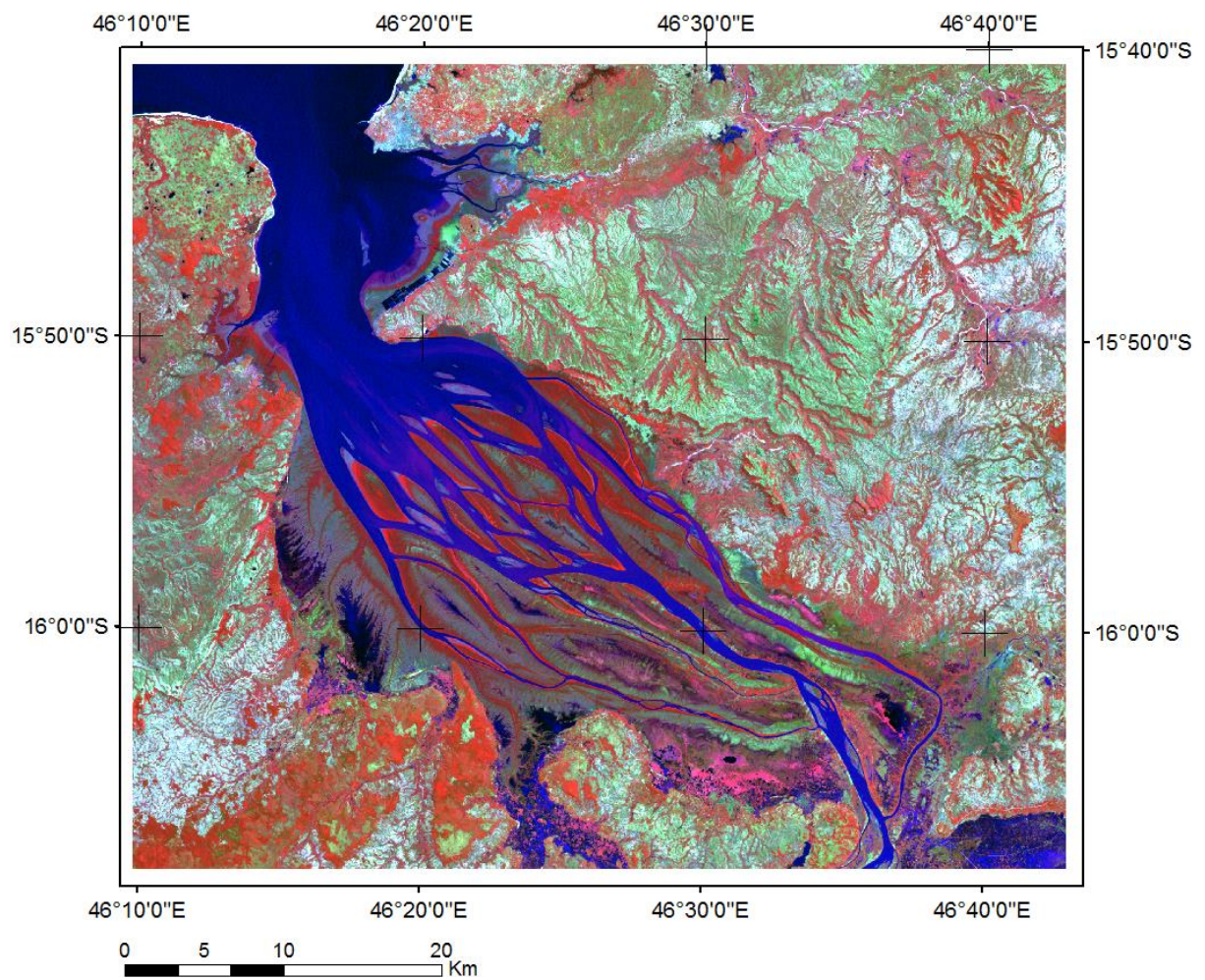


*Figura 18. Imagen del año 2016, muestra las zonas de aguas poco profundas.*

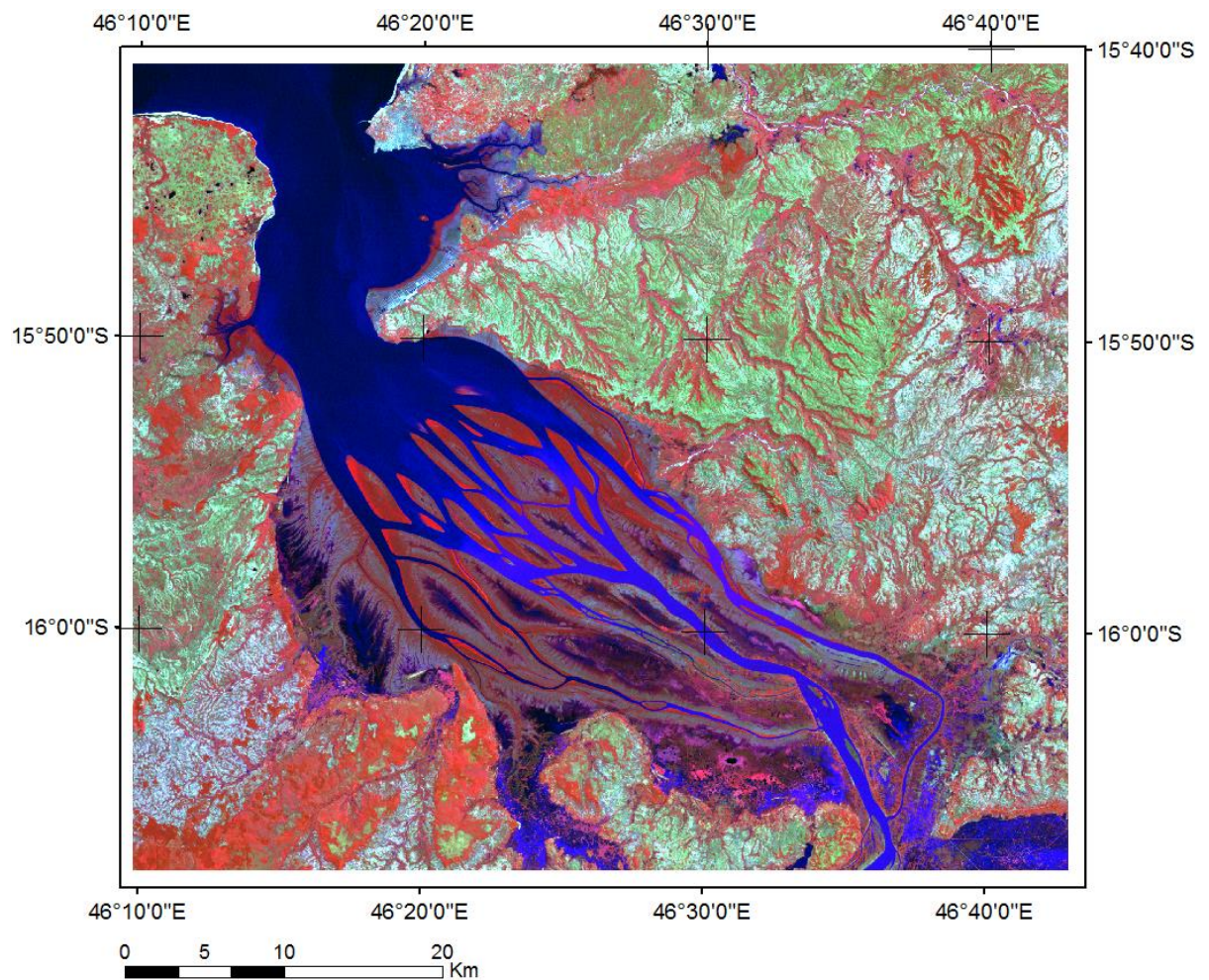


### 6.3 Análisis de las mareas

Se ha comparado dos imágenes, una con marea baja Figura 19 y otra con marea alta Figura 20 con el objetivo de analizar la variación de marea.



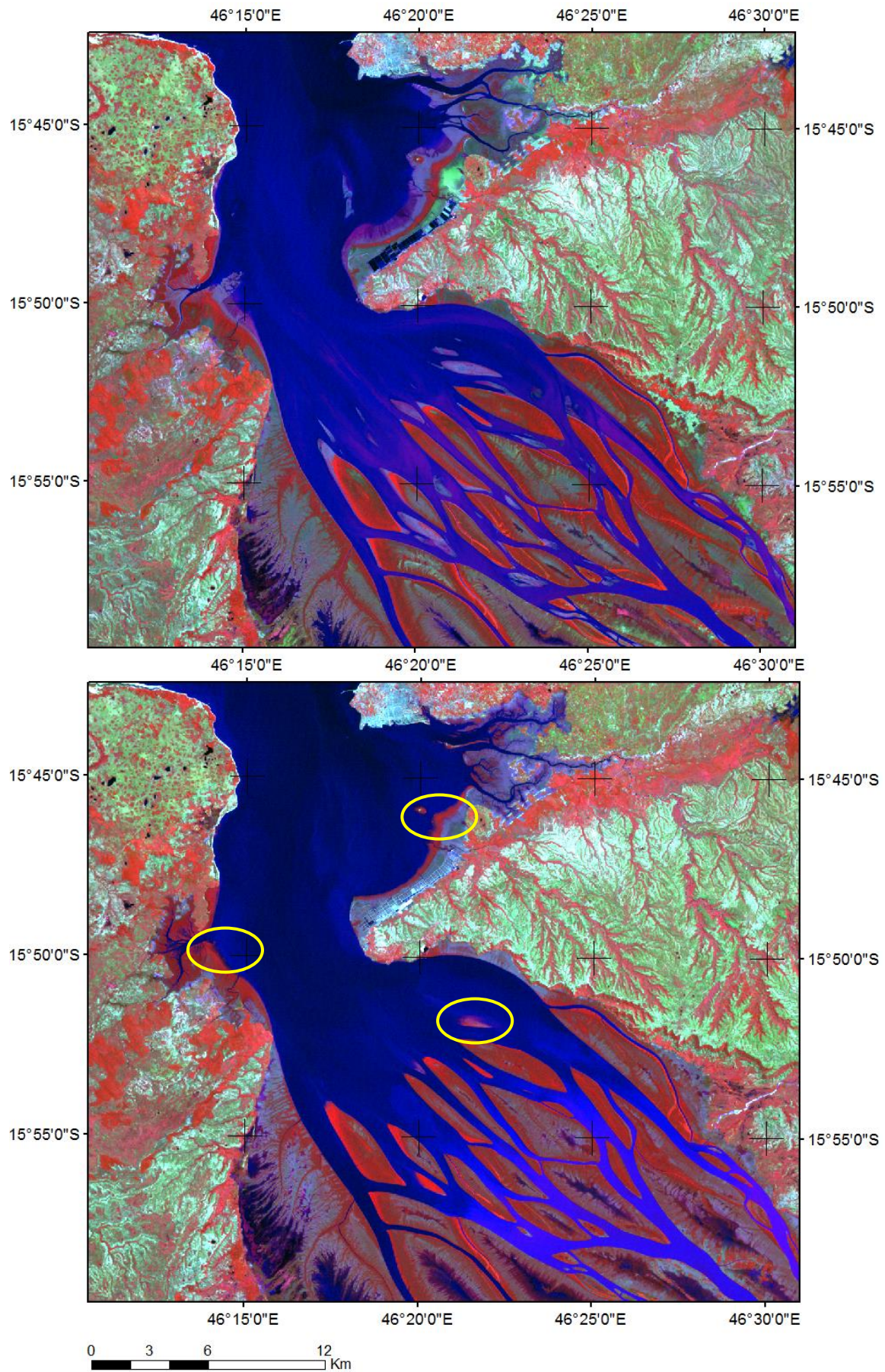
*Figura 19. Imagen del año 2000, marea baja.*



*Figura 20. Imagen del año 2000, marea alta.*

El cambio de mareas en la bahía de Bombetoka facilita el transporte de sedimentos. Debido a su gran variación, aparecen y desaparecen pequeñas islas o bancos de arena que pueden llegar a medir 3 Km (Figura 21). También se observa como la línea de costa retrocede hasta 2Km en algunos puntos. Estos cambios se han acentuado con el paso de los años a causa del aporte de sedimentos procedente de la parte superior de la cuenca.





*Figura 21. Comparativa de mareas. La primera es marea baja y la segunda marea alta.*

En la Figura 22 se observa cómo afecta la variación de marea en la superficie. Más de 8.000ha son inundadas cada vez que hay plena mar.

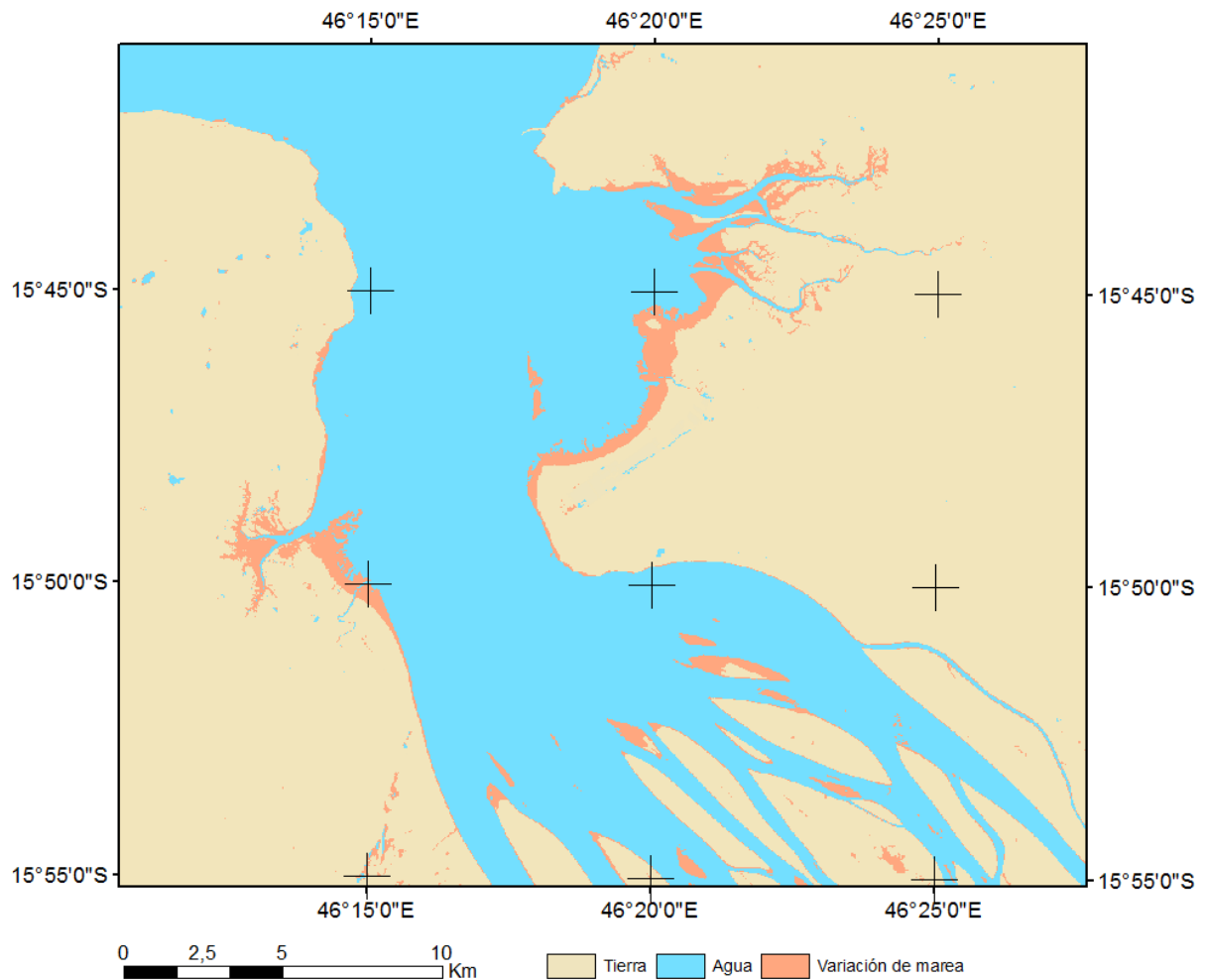


Figura 22. Mapa de variación de marea.

#### 6.4 Análisis de índices de agua

Se ha comparado imágenes consecutivas con 5 años de diferencia para observar el cambio en la bahía de Bombetoka respecto a la superficie de tierra y agua. Hay que tener en cuenta las mareas, conocer el estado de la marea en el instante de la captura de la imagen nos facilitara analizar los resultados.

En Figura 23 se ha comparado los índices de agua de 1989 y 1995. En esta comparativa la imagen de 1989 se realizó con alta mar y la de 1995 con baja mar. Debido al cambio de marea, los bancos de arena del estuario aumentan su tamaño e incluso se forman nuevos. También la línea de la costa retrocede en algunos puntos. Pero más allá del cambio de nivel del agua producido por la marea se puede observar inundaciones en los pantanos cercanos a la bahía y en los campos de arroz.

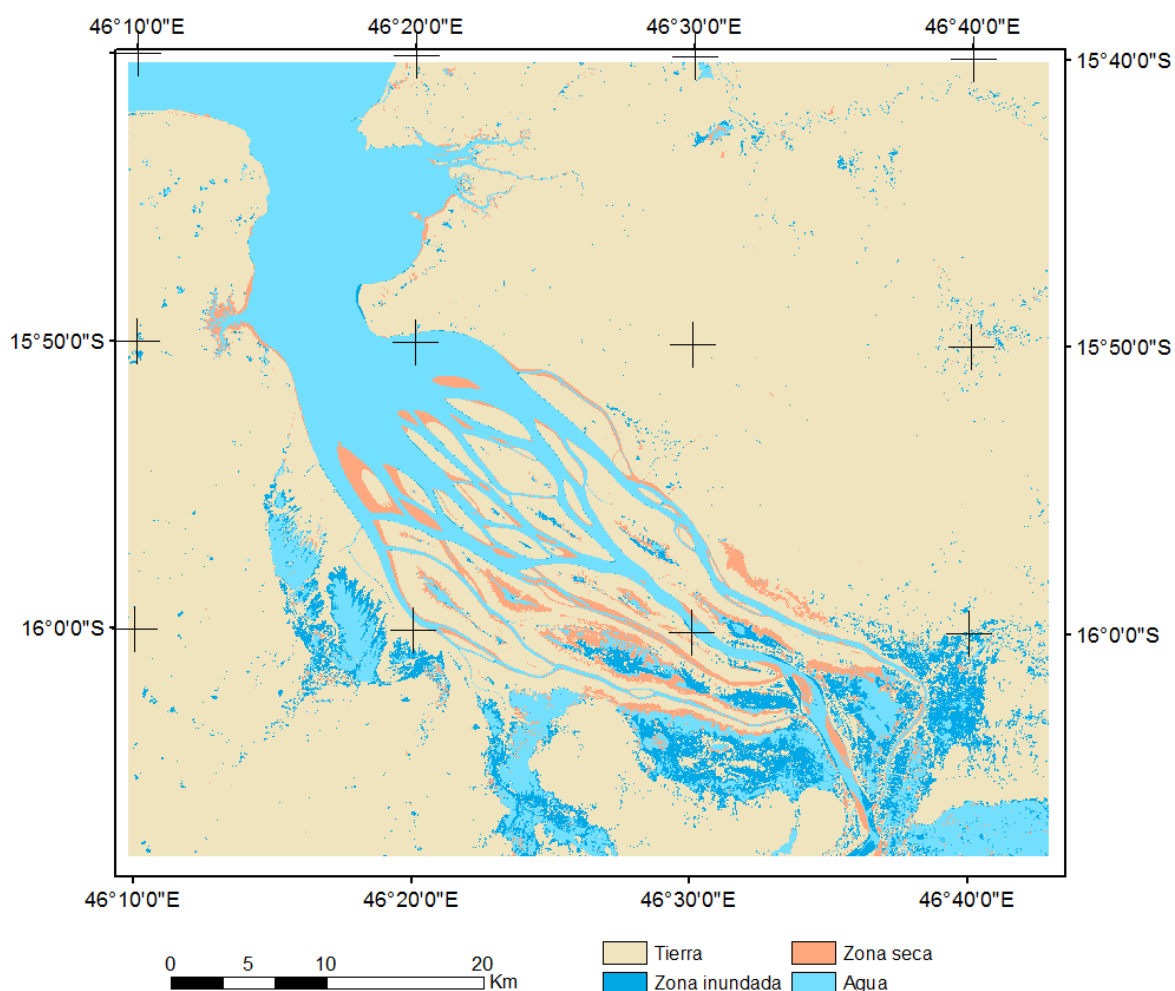
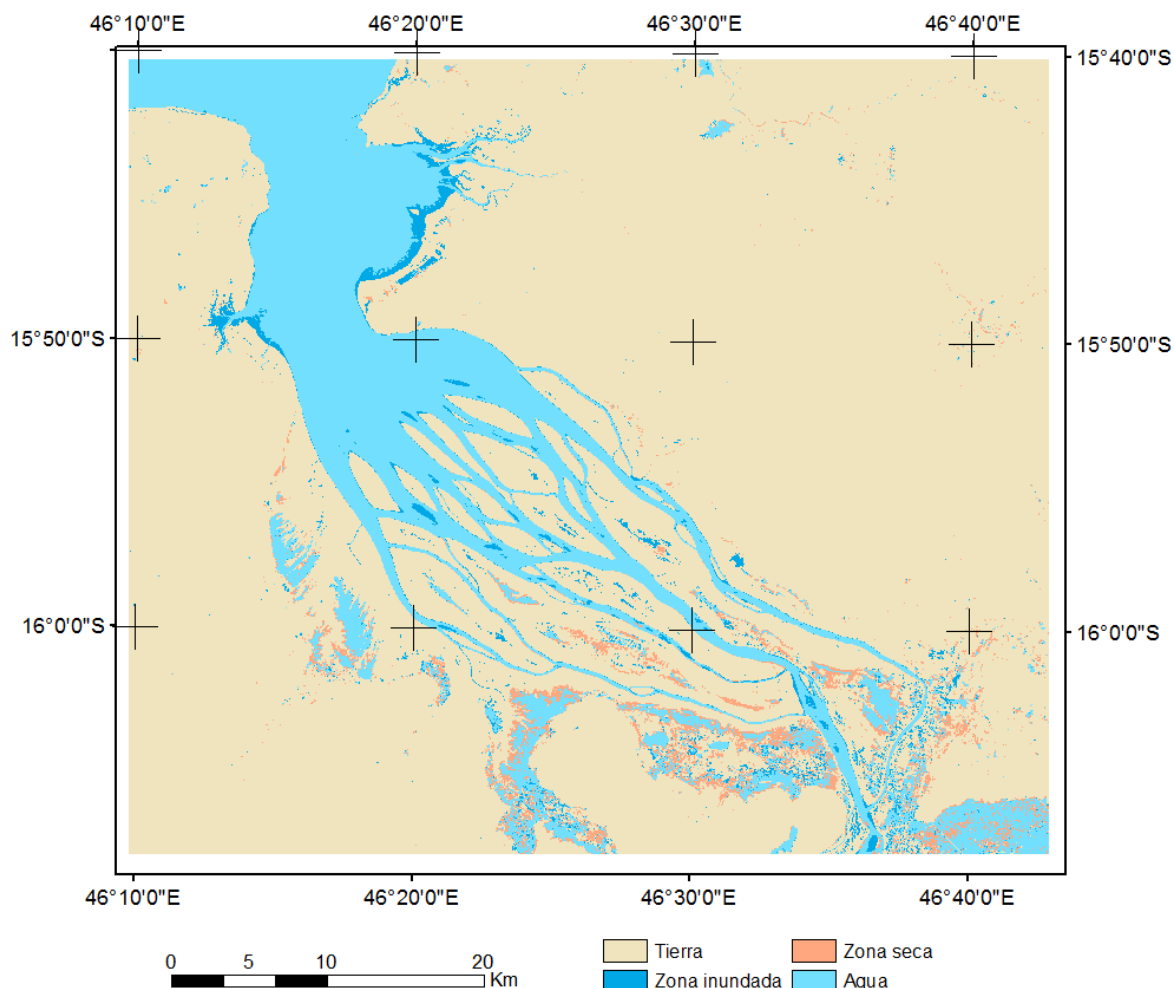


Figura 23. Mapa de combinación analítica de los índices de agua entre el año 1989 y 1995.

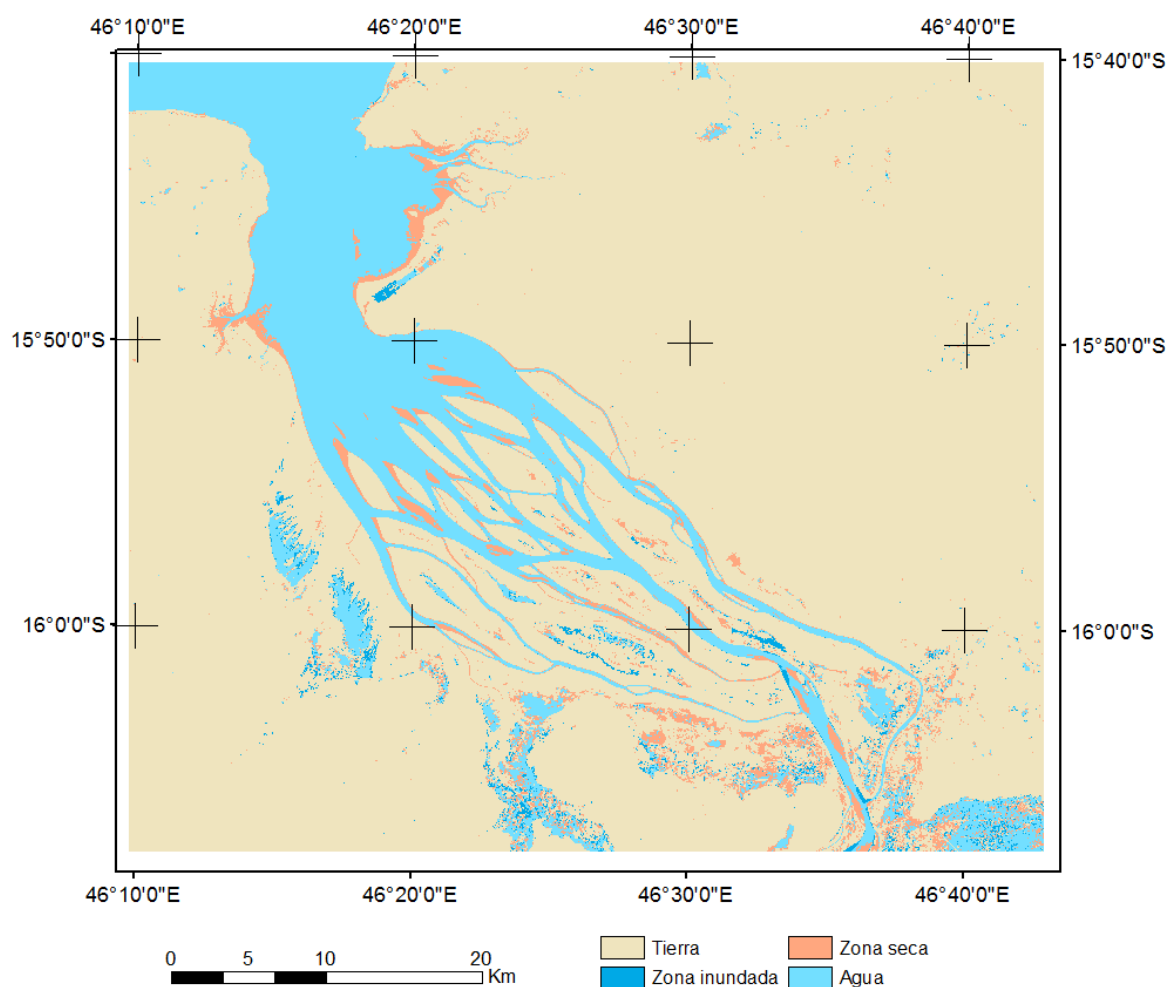


En la Figura 24 se ha comparado los índices de agua de 1995 y 2000. En el momento que se realizaron las imágenes, las mareas eran diferentes siendo la de 1995 marea baja y la del 2000 marea alta. La mayoría de las zonas inundadas están producidas por la alta mar por ejemplo los bancos de arena y la línea de costa. En el transcurso de estos años se han creado unos campos de cultivo que se muestran inundados.



*Figura 24. Mapa de combinación analítica de los índices de agua entre el año 1995 y 2000.*

En la Figura 25 se ha comparado los índices de agua de 2000 y 2006. La mayoría de las zonas que se han secado son producidas por la diferencia de marea que hay entre las dos imágenes siendo la de 2000 una marea alta y la de 2006 una marea baja. Las zonas inundadas pertenecen a los pantanos alrededor del estuario y un nuevo tramo de superficie de cultivo de arroz.



*Figura 25. Mapa de combinación analítica de los índices de agua entre el año 2000 y 2006.*



En la Figura 26 se ha comparado los índices de agua de 2006 y 2010. En el momento que se realizaron las imágenes la marea era diferente en ambas siendo la de 2006 marea baja y la del 2010 marea alta. A causa de la diferencia de altura de las mareas se muestran zonas inundadas en la línea de la costa y bancos de arena en el estuario. También se observan zonas inundadas en los pantanos cercanos a la bahía y en los campos de arroz. El área de cultivo que años anteriores había surgido se ha secado.

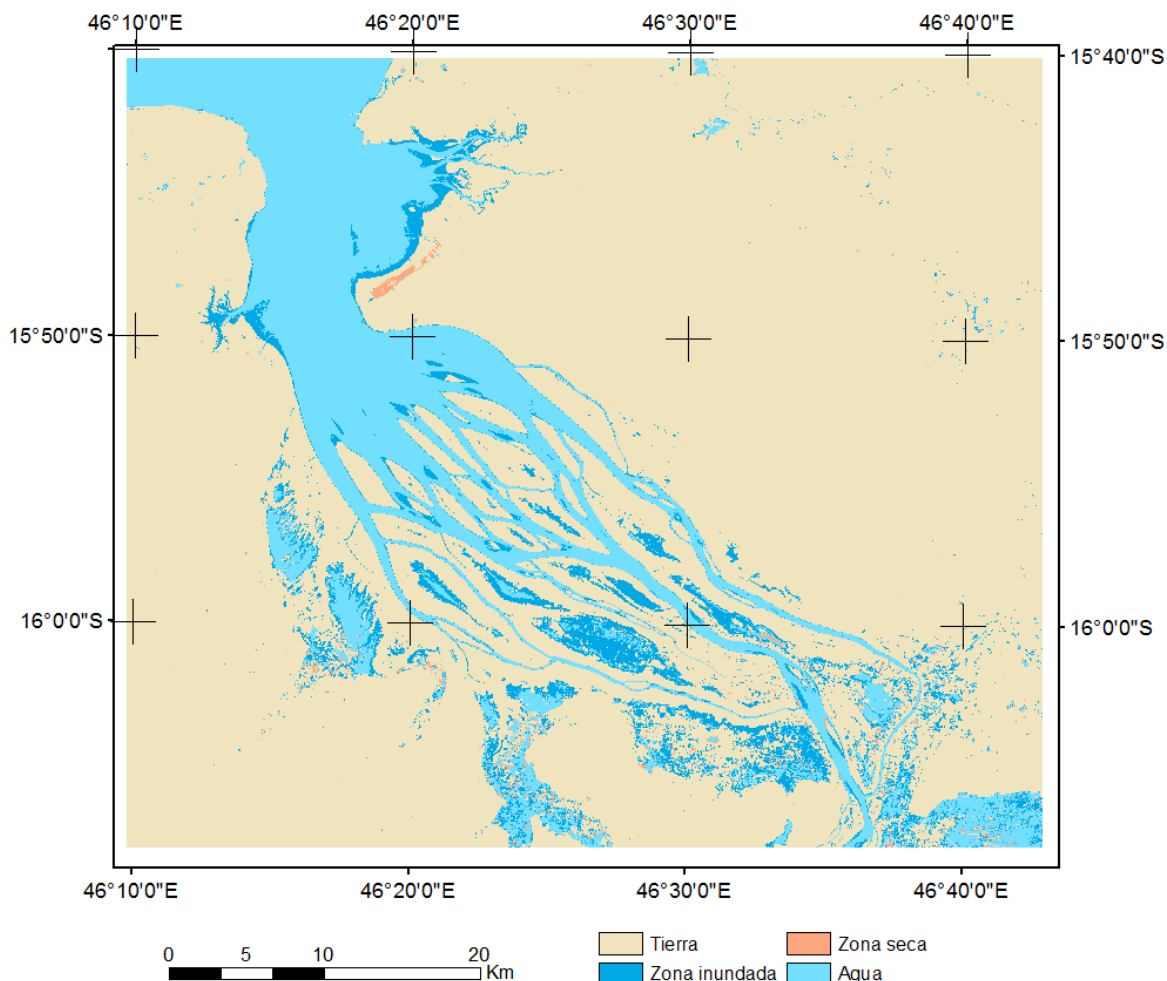


Figura 26. Mapa de combinación analítica de los índices de agua entre el año 2006 y 2010.

En la Figura 27 se ha comparado los índices de agua de 2010 y 2016. Las zonas que se han secado son producidas por la diferencia de mareas. Las imágenes se realizaron con un estado de la marea diferente, la imagen de 2010 tiene la marea alta y la de 2016 baja. Provocando que la línea de costa disminuya y crezcan los bancos de arena e incluso se formen nuevos. Las zonas inundadas pertenecen a los pantanos cercanos al estuario y los campos de arroz.

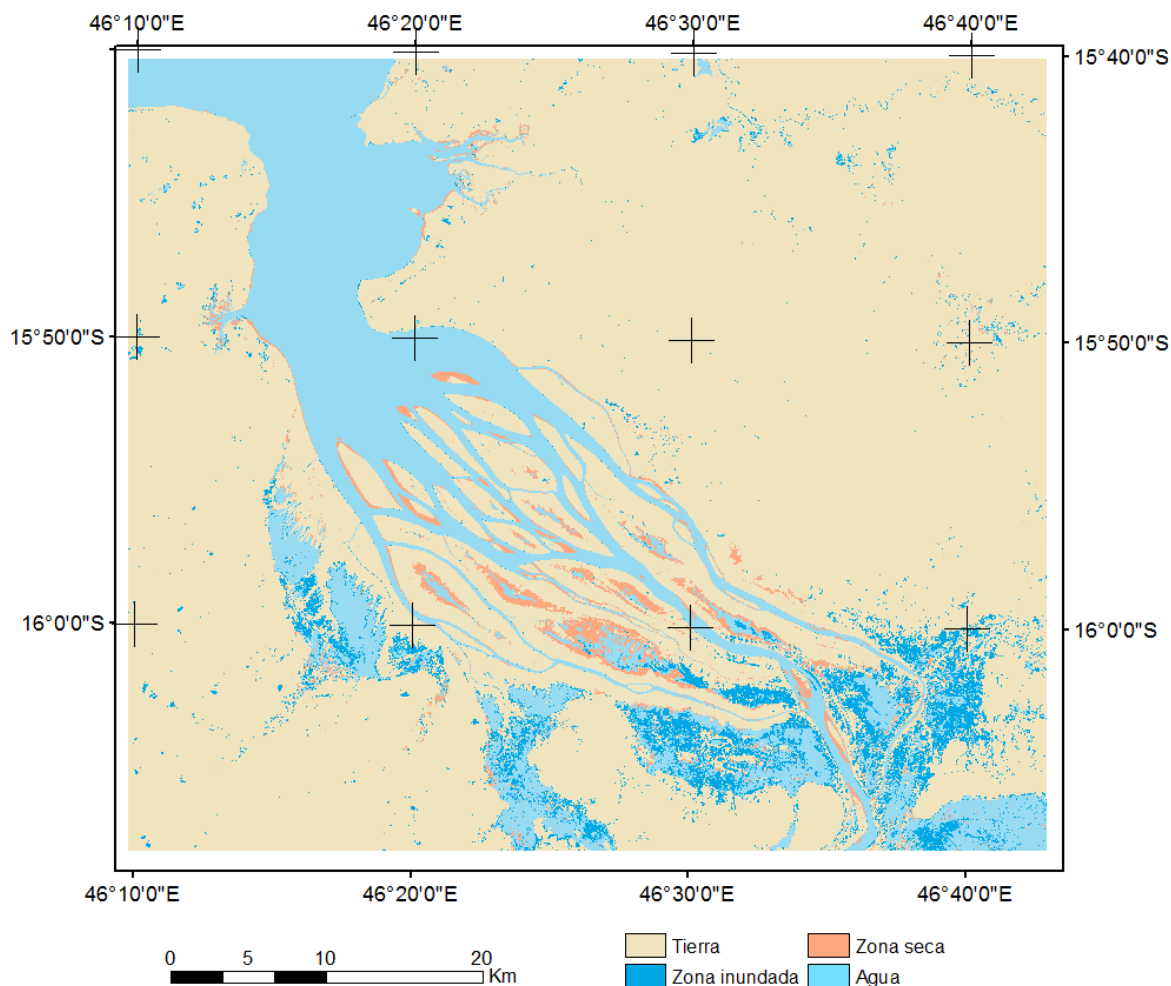
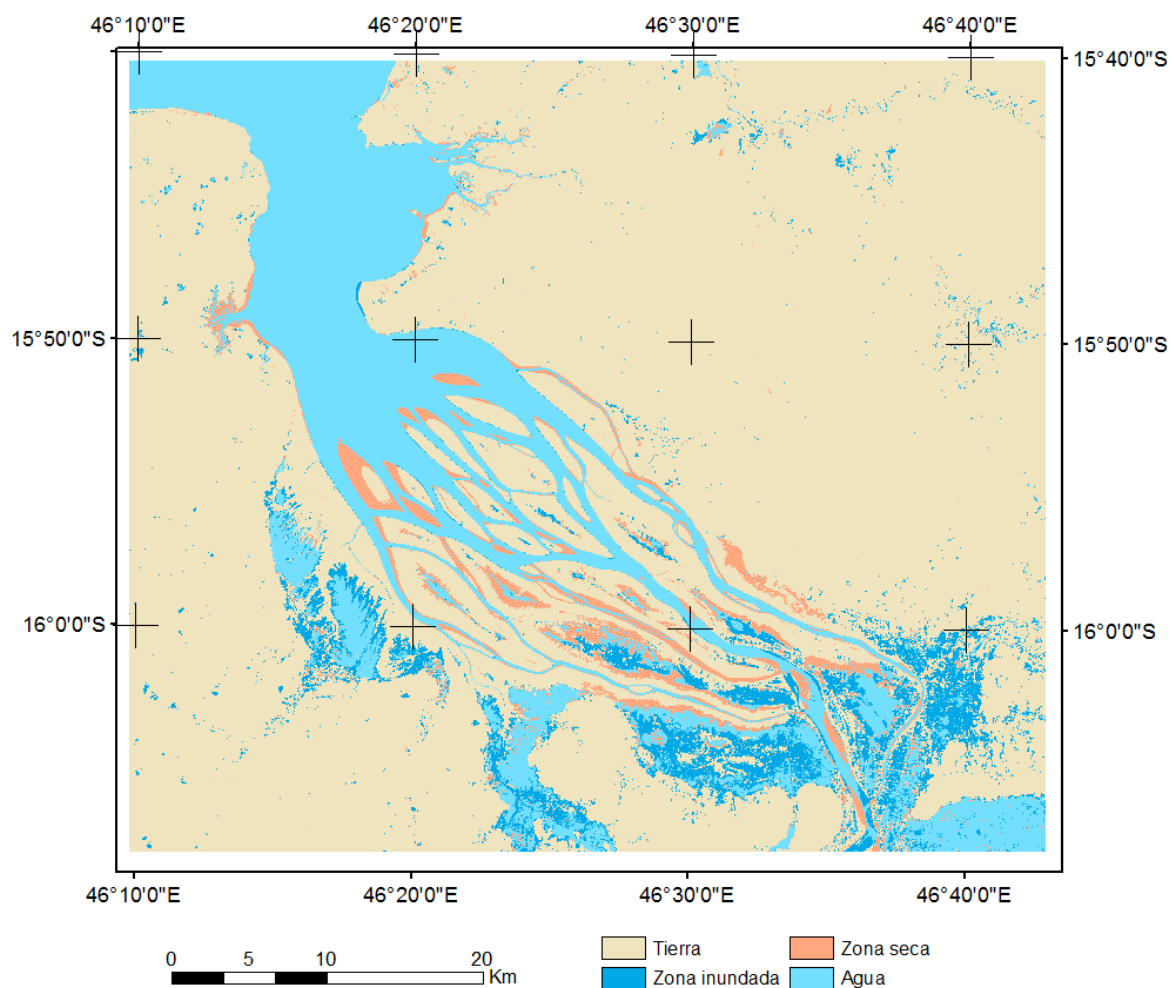


Figura 27. Mapa de combinación analítica de los índices de agua entre el año 2010 y 2016.

En la Figura 28 se ha comparado los índices de agua de 1989 y 2016, esta comparación engloba todos los años del estudio. Sin tener en cuenta los cambios producidos por la diferencia de mareas, se puede observar la gran inundación que están teniendo los pantanos cercanos a la bahía y sobre todo los campos de arroz, la Figura 28 muestra más de 14.000 ha inundadas.



*Figura 28. Mapa de combinación analítica de los índices de agua entre el año 1989 y 2016.*

## 6.5 Análisis de los índices de vegetación

Se ha realizado una comparación de los índices de vegetación de las imágenes. Estas comparaciones de las imágenes son consecutivas. Este análisis no tendrá en cuenta las mareas ya que la variación que producen no afecta a la vegetación, es decir, la marea no alcanza la vegetación.

En la Figura 29 se ha comparado los índices de vegetación de 1989 y 1995. Se observa que la vegetación ha crecido en los bancos de arena y en algunos puntos de la línea de costa. Las pérdidas de vegetación se sitúan alrededor de los pantanos que están cerca del estuario.

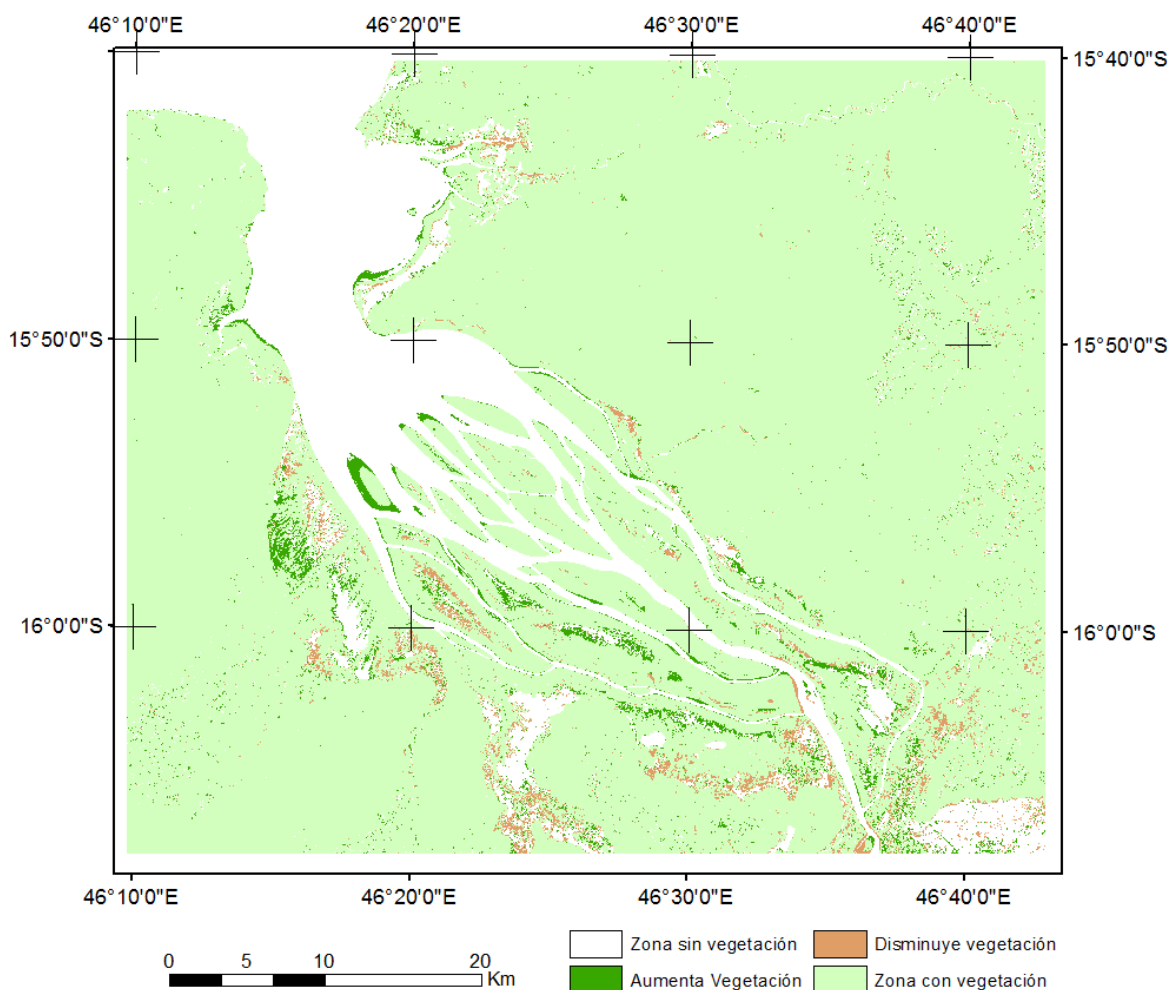
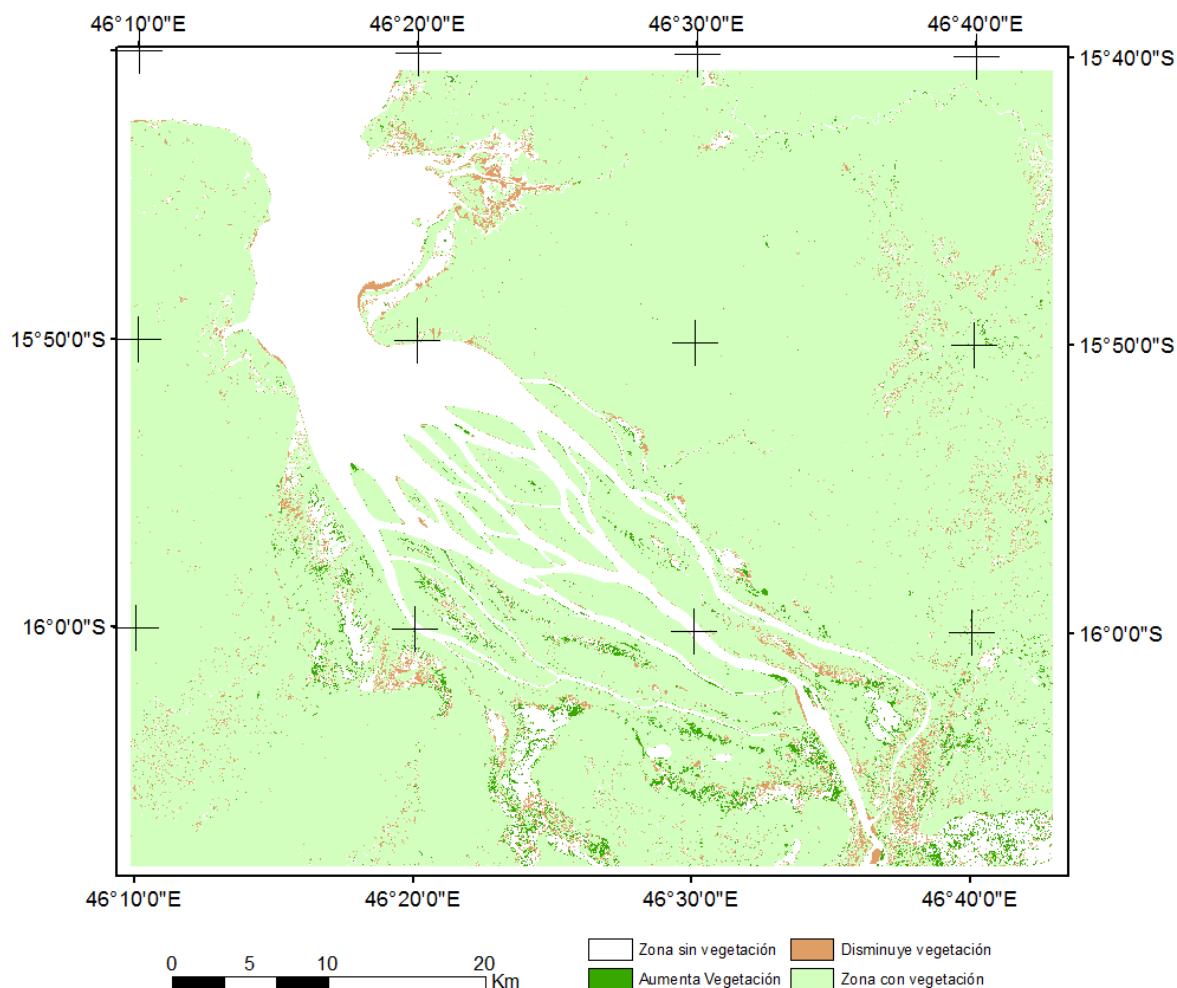


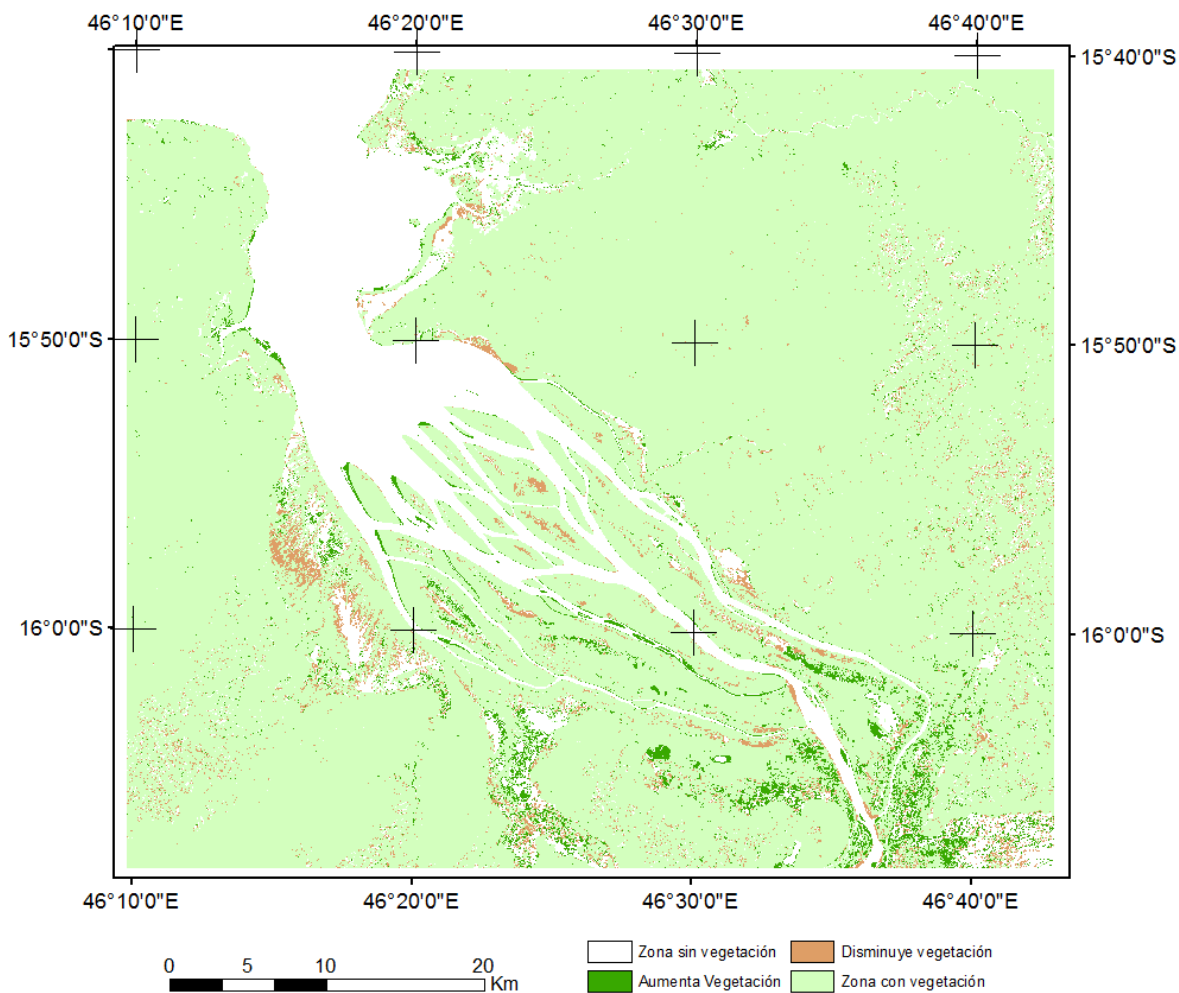
Figura 29. Mapa de combinación analítica de los índices de vegetación entre el año 1989 y 1995.

En la Figura 30 se ha realizado la comparación de los índices de vegetación de 1995 y 2000. Se observan pérdidas de vegetación en la línea de la costa, en los campos de arroz y alrededor de los pantanos situados a las cercanías del estuario.



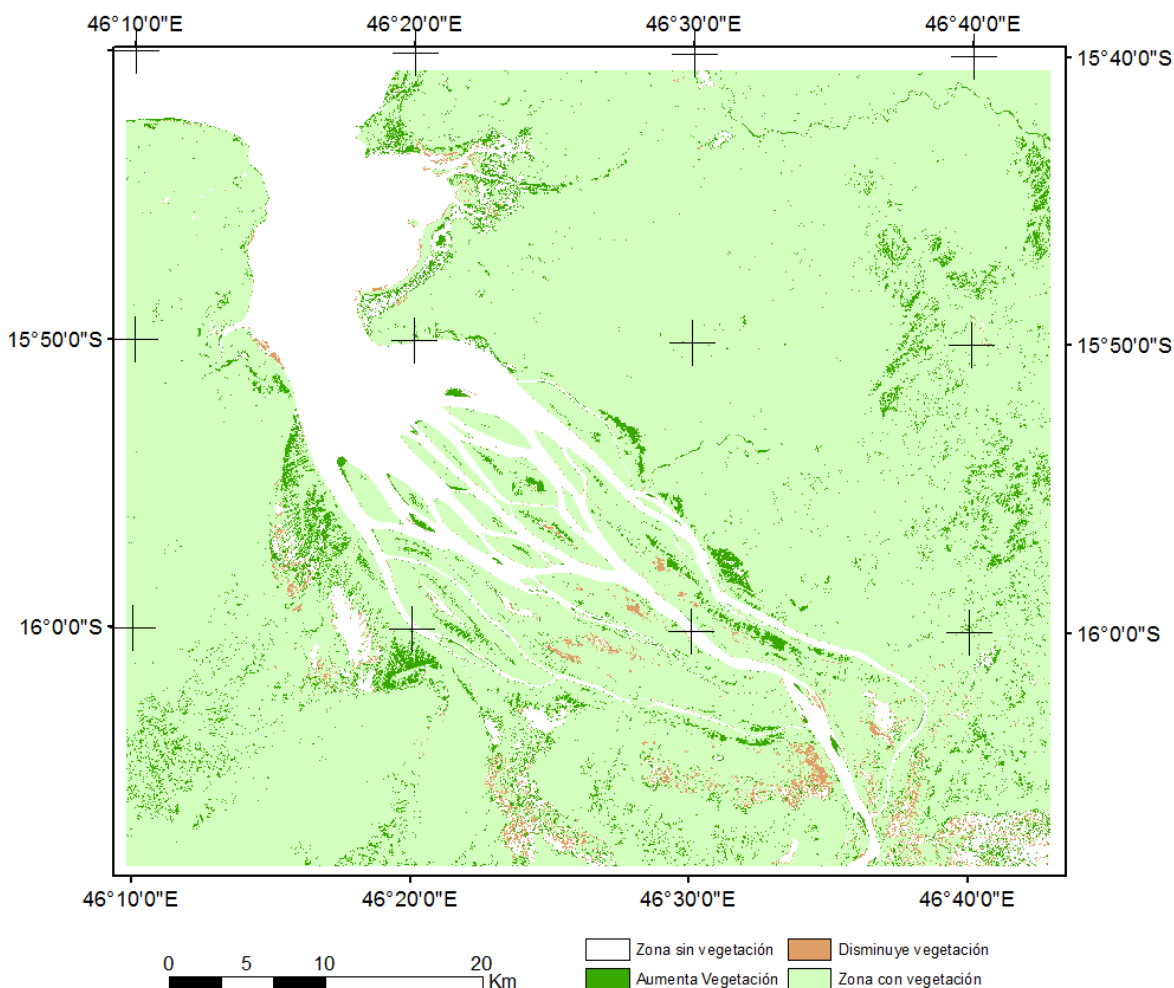
*Figura 30. Mapa de combinación analítica de los índices de vegetación entre el año 1995 y 2000.*

En la Figura 31 se ha realizado una comparación de los índices de vegetación de 2000 y 2006. En ella se muestran zonas donde ha crecido la vegetación, estas zonas están situadas en la línea de la costa, en los laterales del río y en los bancos de arena o islotes pequeños. Respecto a las pérdidas de vegetación se dan en los pantanos alrededor del estuario.



*Figura 31. Mapa de combinación analítica de los índices de vegetación entre el año 1995 y 2000.*

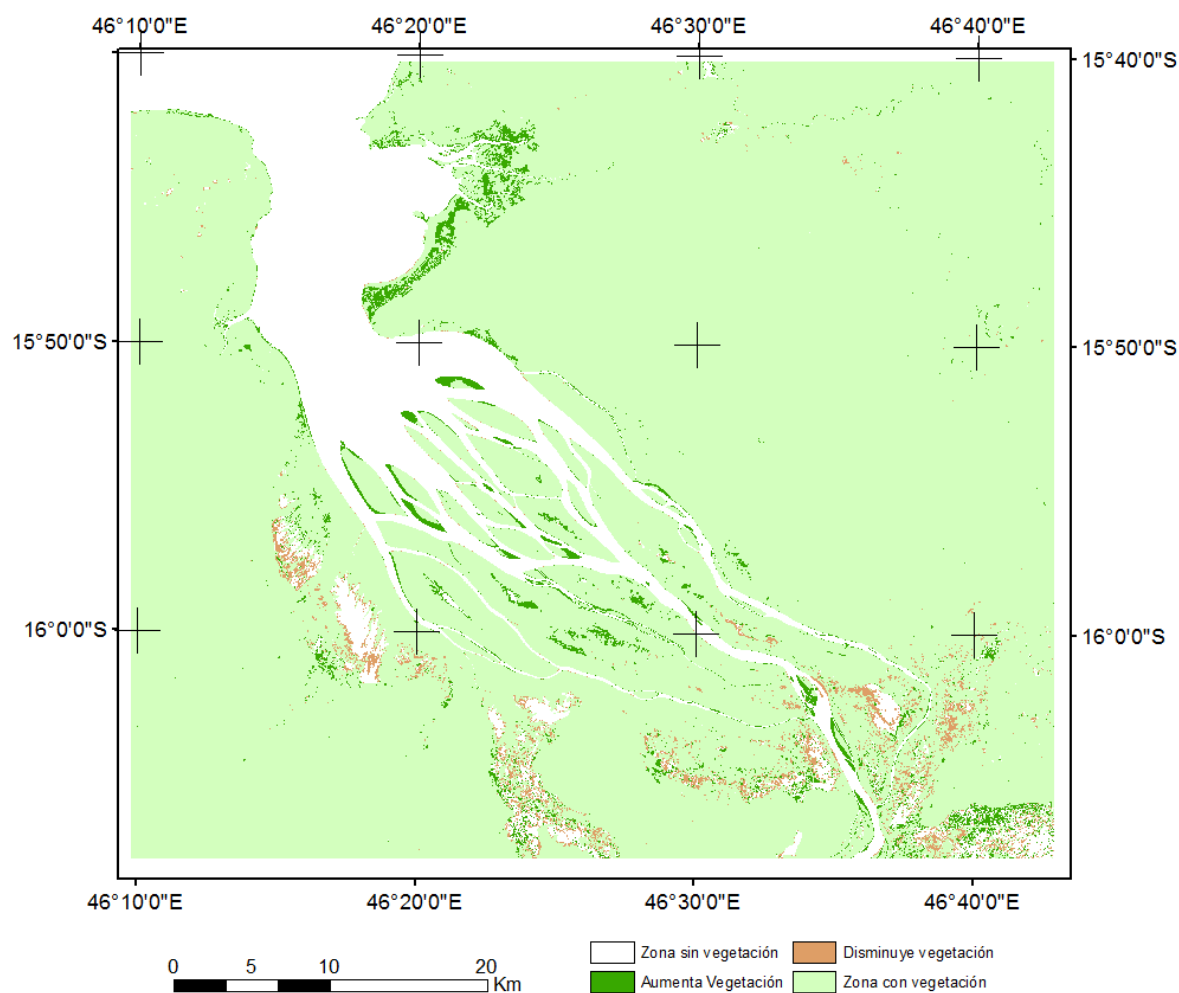
En la Figura 32 se ha comparado los índices de vegetación de los años 2006 y 2010. En esta comparación la vegetación sigue creciendo en los bancos de arena y en algunos puntos de la línea de costa. También crece en los campos de cultivo y en algunos puntos en los laterales del río. Las pérdidas de vegetación se localizan en los pantanos y en los campos de arroz.



*Figura 32. Mapa de combinación analítica de los índices de vegetación entre el año 2006 y 2010.*



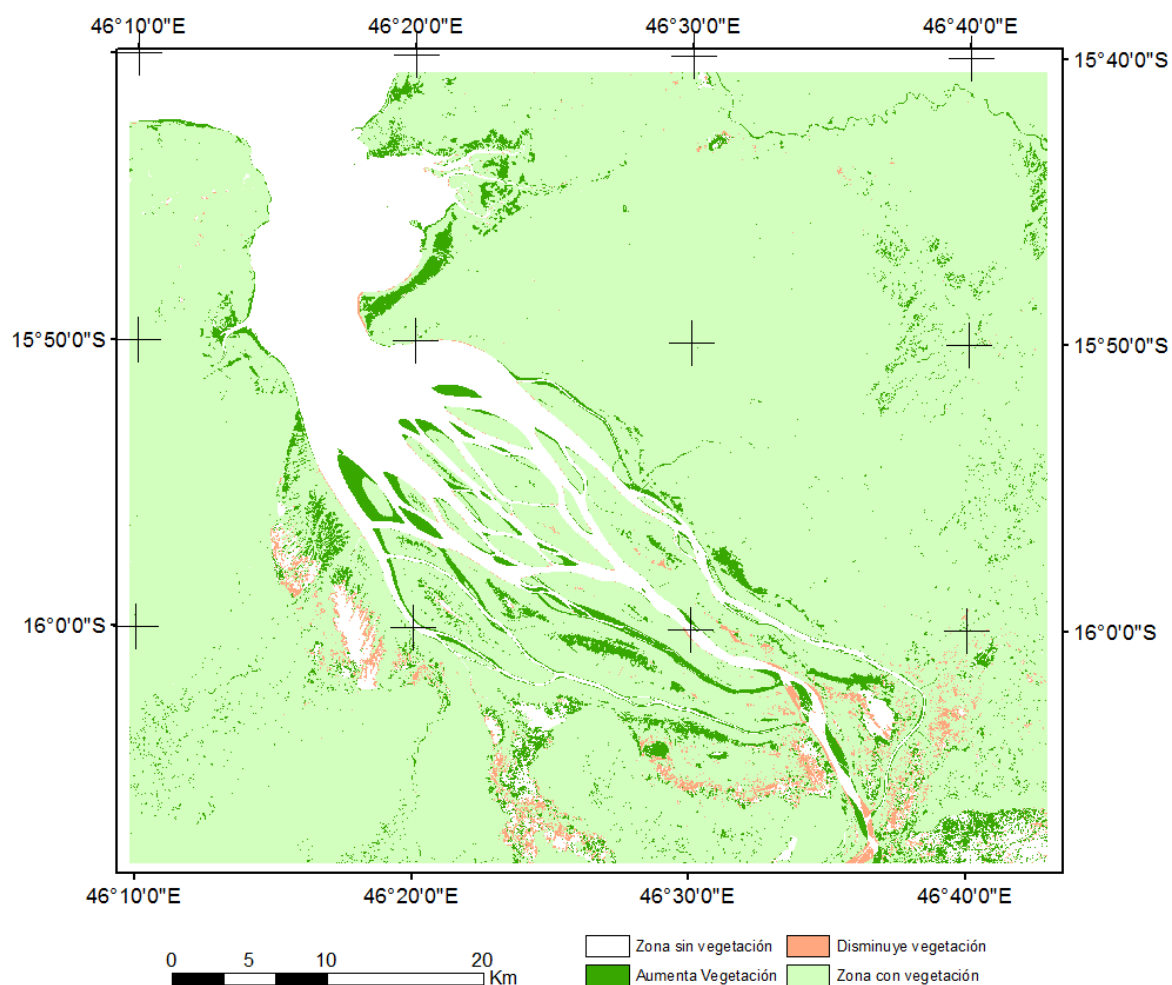
En la Figura 33 se ha realizado una comparación de los índices de vegetación de los años 2010 y 2016. En esta comparación se muestran las ganancias de vegetación situadas en los bancos de arena o pequeñas islas y en los campos de cultivo. Las pérdidas de vegetación se muestran alrededor de los pantanos cercanos al estuario y en los campos de arroz.



*Figura 33. Mapa de combinación analítica de los índices de vegetación entre el año 2010 y 2016.*



En la Figura 34 se muestra una combinación de índices de vegetación de 1989 y 2016 cubriendo todos los años del estudio. En esta comparación se muestra la superficie que ha ganado vegetación y que ha perdido. Las ganancias se dan en los bancos de arena, en los campos de cultivo, en la línea de la costa y en una de las bifurcaciones del río. Las pérdidas de vegetación se concentran en los pantanos cercanos al estuario y en los campos de arroz.



*Figura 34. Mapa de combinación analítica de los índices de vegetación entre el año 1989 y 2016.*

## 7 Conclusiones

La bahía de Betsiboka es muy importante para la agricultura en Madagascar, en las cercanías al estuario hay muchos campos de arroz que son la principal fuente de economía. Toda la zona de la bahía está siendo afectada por la deposición de sedimentos que vienen de las tierras del interior.

Un porcentaje de los sedimentos se estancan en la bahía, haciendo del fondo de la bahía una superficie plana. Esto afecta directamente a la variación de marea que cada vez es más pronunciada, ayudando a transportar los sedimentos. Se muestra con la banda Coastal del Landsat 8 que proporciona máxima penetración en aguas poco profundas.

Al comparar la combinación analítica de los índices de agua y vegetación se observa que alrededor de los pantanos se pierde vegetación y se gana agua lo que nos indica que los sedimentos también van a parar a los pantanos haciendo que suba la cota de agua y pierda vegetación.

Los campos agrícolas se reducen ya que las tierras de cultivo y pastizales se han convertido en pantanos lodosos debido a la alta deposición de sedimentos impulsados por la deforestación y el riego con agua fangosa.

Entorno a la vegetación, la eliminación del bosque primario para sustituirlo por pastizales para el cultivo en los últimos 50 años, ha conducido a pérdidas anuales masivas de suelo. Las mayores pérdidas registradas en cualquier parte del mundo.

Respecto al aumento o pérdida de suelo de la bahía no se tiene en cuenta el índice de agua debido a las mareas, pero si el de vegetación. El índice de vegetación que compara las imágenes de 1989 y 2016, muestran zonas que crece la vegetación como en los bancos de arena algunos puntos de la línea de costa y en las orillas del río. Esto quiere decir que ha ganado superficie y no afecta la marea ya que no crecería la vegetación.

## Bibliografía

Bakoariniaina, L. N., Kusky, T., Raharimahefa, T. (2006). Disappearing Lake Alaotra: Monitoring catastrophic erosion, waterway silting, and land degradation hazards in Madagascar using Landsat imagery. *Journal of African Earth Sciences*, 44(2), 241–252.

Franklin, S. E., Ahmed, O. S., Wulder, M. A., White, J. C., Hermosilla, T., Coops, N. C. (2015). Large Area Mapping of Annual Land Cover Dynamics Using Multitemporal Change Detection and Classification of Landsat Time Series Data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 293–314.

Raharimahefa, T., & Kusky, T. M. (2010). Environmental monitoring of Bombetoka bay and the Betsiboka estuary, Madagascar, using multi-temporal satellite data. *Journal of Earth Science*, 21(2), 210–226. <http://doi.org/10.1007/s12583-010-0019-y>

## **Anexo- Traducción**

Traducción al inglés del 30% de la memoria para el cumplimiento de las competencias básicas en lengua extranjera.

### **COMPARATIVE ANALYSIS OF THE SURFACE OF THE BAY BOMBRTOKA (MADAGASCAR) WITH LANDSAT IMAGES**



## Introduction

Betsiboka, the biggest river in Madagascar (600kms. in length) is an important conduit for transporting eroded sediments from the central highlands of Madagascar.

The river Betsiboka originates in the capital of Madagascar, (Antananarivo) and flows to Mahajanga, one of the six biggest cities on the island, and the second most important port in the country. The salty waters of the Mozambique Channel penetrate inland to join with the freshwater outflow of the Betsiboka River, forming Bombetoka Bay. On the other hand, the high torrent of the rainy season and the strong dynamics of the rivers make sure that the fresh water prevails over the marine influences.

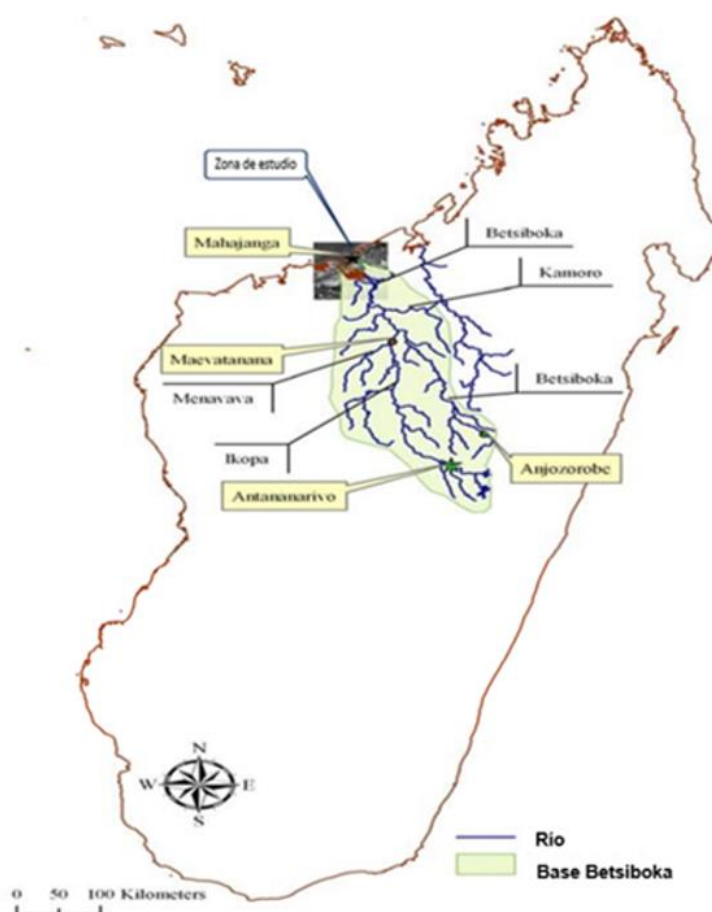


Figure 35. Map basin of the Betsiboka. Source: (Raharimahefa & Kusky, 2010).

The basin of the Betsiboka is very important for the agriculture in Madagascar, covering approximately 49000 km<sup>2</sup>. The estuary of Betsiboka has many sources, including the river Ikopa, the river Menavava and the river Kamoro.

It has been reported that in the last 30 years, the depth of the river Betsiboka close to the estuary is decreasing.

There are various reasons that are provoking this catastrophic erosion, for example, the negative effects of human activities, such as forest fires, the felling of trees, and overgrazing, all which cause the erosion and the fluvial deposition.

The regular occurrence of tropical storms bring severe rainfall which causes floods every year with an average duration of 35 days. Marovoay plain is the second biggest rice growing region in Madagascar.

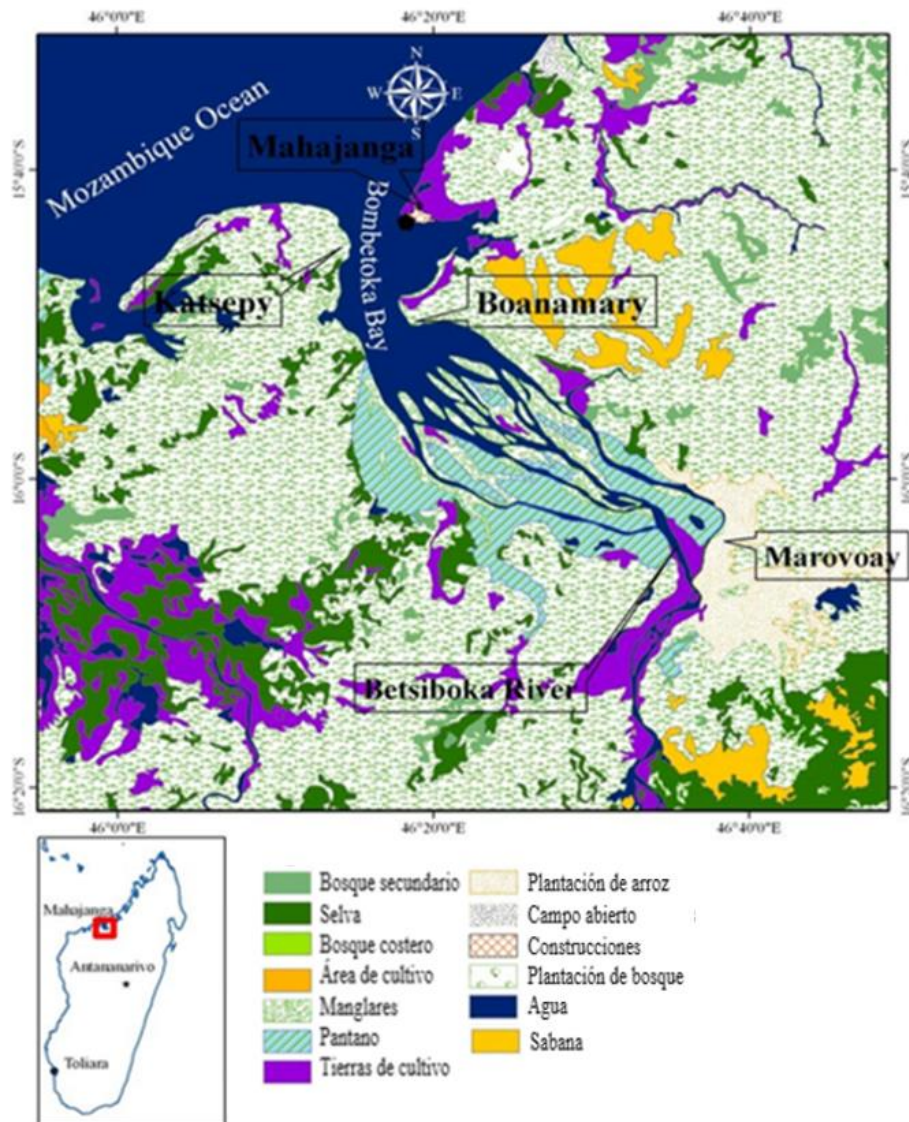


Figure 36. Map land uses Bombetoka Bay. Source: (Raharimahefa & Kusky, 2010).

The bay of Bombetoka is very important in terms of economy, biology and geology. Large rice fields and shrimp farms can be found in this area. Relating to biology, large chains of mangroves which are associated with numerous sand banks, small islands with shallow water in the estuary.

The water level is relatively low (5 m deep) due to the deposition of red sediments, which are carried by the river Betsiboka. The sediments produced by *lavakas* (a local name for large erosive ravines) (Figure 3) are the main source of thickness of red mud deposited in the bay of the estuary. These are eroded easily due to the fact that the grasslands are not able to sustain the land. The loss of land which has been observed down the entire river Betsiboka has grown exponentially in the last 30 years, and is known to be between the biggest registered erosions in the world.

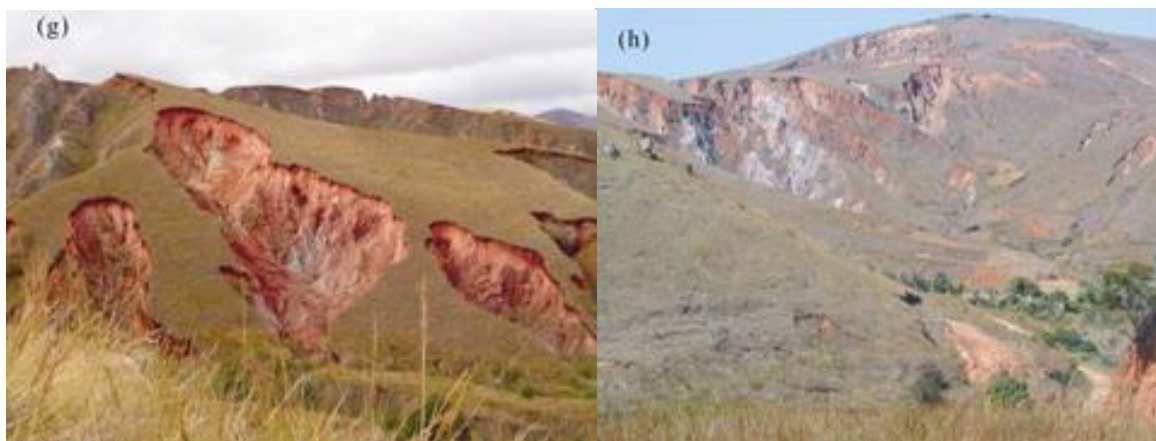


Figure 37. Lavakas. Source: (Raharimahefa & Kusky, 2010).

The sediment of the delta of the river Betsiboka and the estuary is the result of the tropical erosion which has leached the ground. The majority of this is made up of iron, giving it its characteristic red colour.

Deforestation in the central part of Madagascar has been very active since the colonial period and this accelerates the ground erosion. The satellite images show that Madagascar is 'bleeding' into the ocean because of the impact of deforestation, the tropical erosion and the ignorance of the uncontrolled exploitation of natural resources.

Agriculture is the main economical activity in Madagascar. The rice fields close to the estuary are affected by thick layers of mud which ruins part of the crop. ( Figura 4).



Figure 38. Rice field with mud layer. Source: (Raharimahefa & Kusky, 2010).

Now, only a small percentage of the surface of the island is suitable for agricultural purposes, due to the abundance of lavakas. These ravines formed by erosion are being rapidly converted into a geomorphological characteristic of Madagascar. In Figure 5. The flow of mud which is found close to the lavakas, can be seen.



*Figure 39. Mudflows. Source: (Raharimahefa & Kusky, 2010).*

Logging and burning of forests for agricultural reasons, and the production of coal are still active in many locations on the island, which contributes to the formation of new lavakas. Logging in native forests greatly increases the erosion of the ground. It also contributes, on a lesser scale, to the active movement of Madagascar. The climate and the atmospheric conditions in Madagascar also increase erosion.

The yearly rainfall and typhoons make the transportation of sediments to the higher grounds on the coast of Madagascar easier, especially in the areas that have recently been deforested.

The bay of Bombetoka is an important area for the study of the rates of erosion and active sediments and a critical point for the analysis of atmospheric changes. It is a shallow estuary of marine sedimentation, in which the delta is growing as the rate of supplies of the river Betsiboka is greater than the rate of dispersion of sediments by the waves and tides.



## Objectives

The main object of the project is the analysis and understanding of the evolution of the bay of Bombetoka between 1998 and 2016, using techniques of detection of changes based on the satellites Landsat 5 and Landsat 8.

To meet the main objective, the following secondary objects are needed:

- To detect the suspended sediment that the water of the river Bombetoka transports in each diagram, and to observe up to where it penetrates the ocean.
- To observe the surface of shallow waters in the Bombetoka bay
- To calculate, identify and compare the height of the tide at the moment of capturing the image.
- To analyse the indexes of the water in each of the images, and to compare the surface of water and land.
- To analyse the index of vegetation in each of the images and to observe the evolution.

## Area studied

Madagascar is the biggest island on the African continent and is found entirely surrounded by the Indian Ocean. On the North East coast of Madagascar, the salty waters of the Mozambique Canal penetrate towards the interior to unite with the exit of the fresh water of the river Betsiboka, forming the Bay of Bombetoka, situated close to the city of Mahajanga.

The area studied is centred in the bay of Bombetoka, with a surface of 300.600 ha. Its coordinates are 15°49'60"S and 46°16'60"E. The area studied has coordinates that go from 15°40'S a 16°10'S latitude, and 46°10'E to 46°50'E longitude.



Figure 40. Location of the study area. Source: Google Earth.

## Data used

The images used were obtained from the Landsat 5 and Landsat 8. Landsat 5 was launched in 1984 and was operative until 2011, meanwhile, Landsat 8 was launched in 2013 y is still operative today. Both belong to the American Space Agency Landsat Project.

### Characteristics of Landsat 5

Landsat 5 is an observational satellite, that was launched on 1<sup>st</sup>. March 1984 and was operative until November 2011. Equipped with the Sensor Thematic Mapper (TM) of 7 bands, where band 6 belongs to infra-red thermal and a multi spectral MSS of 4 bands

It orbited from North to South, at an altitude of 705kms. and with an inclination of 98.2°. Its revisited time was 16 days during which it obtained images of 170kms. Referring to axis East-West.

No.of Band	Length of wave (µm)	Spacial resolution
8- Blue	0,45 - 0,52	30 m
9- Green	0,52 - 0,6	30 m
10- Red	0,63 - 0,69	30 m
11- NIR	0,76 - 0,9	30 m
12- SWIR 1	1,55 -1,75	30 m
13- TIR	10,41 - 12,5	120 m
14- SWIR2	2,08 - 2,35	30 m

*Table 5. Features sensor Thematic Mapper (TM) Landsat 5 satellite.*

### Characteristics of Landsat 8

Equipped with the sensor Operational Land Imager (OLI) the satellite Landsat 8 was launched on 11 February 2013 and, is still operational today. Its sensor consists of 9 bands with a resolution of 30 metres, except the panchromatic band, which has a resolution of 15 metres. Also incorporated, is the Thermal Infrared Sensor (TIRS) which has two infrared thermal bands.

Band 1 captures the reflection between violet and dark blue, its main utilities are the formation of images in shallow waters, and the tracing of small particles ( smoke, dust....) Bands 2, 3 and 4 correspond to blue, green and red, while band 5 corresponds to close infrared. Bands 6 and 7 are short wave infrared while band 8 captures the reflection of panchromatic. Band 9 detects the reflection of the high clouds formed by ice crystals (Cirrus). Bands 10 and 11 are of TIRS which capture the reflection of thermal infrared.

It has the same characteristics in orbit as Landsat 5.

Number of Band	Length of wave (µm)	Spacial resolution
12- Coastal / Aerosol	0,433 - 0,453	30 m
13- Blue	0,45 - 0,515	30 m
14- Green	0,525 - 0,6	30 m
15- Red	0,63 - 0,68	30 m
16- NIR	0,845 - 0,885	30 m
17- SWIR 1	1,56 -1,66	30 m
18- SWIR 2	2,1 - 2,3	30 m
19- Panchromatic	0,5 - 0,68	15 m
20- Cirrus	1,36 - 1,39	30 m
21- TIRS 1	10,6 - 11,2	100 m
22- TIRS 2	11,5 - 12,5	100 m

Table 6. Features sensor OLI and TIRS Landsat 8 satellite.



## **Images used**

Images were downloaded from the USGS (United States Geological Survey) web page through the visualisation software GLOVIS (Global Visualisation Viewer). These images are classified according to the date of Path and the Row.

In order to carry out a thorough study, the work area needs to be free of clouds. The oldest image of this study is from April 1989 and the most recent data from March 2016, therefore obtaining an evolutionary study of 27 years.

Path 160– Row 071		
Satellite	ID	Date
LANDSAT 5	LST51600711989101JSA00	11/04/1989
	LST51600711995086JSA00	27/03/1995
	LST51600712000084JSA00	24/03/2000
	LST51600712000132JSA00	11/05/2000
	LST51600712006100JSA00	10/04/2006
	LST51600712010095JSA00	05/04/2010
LANDSAT 8	LC81600712013119LGN01	29/04/2013
	LC81600712016064LGN00	04/03/2016

*Table 7. Used images of Landsat 5 and Landsat 8.*

## Methodology

The main work tool in the project is the Miramón programme. Miramón is a System of Geographical Information (SGI) and remote sensing software. It permits the visualisation, query, edition and analysis of raster layers, vector layers and WMS layers.

### Pre-processing

The downloaded images are obtained in TIFF format but to work with the programme Miramon, it is necessary to transform them into IMG format, Miramon's own software.

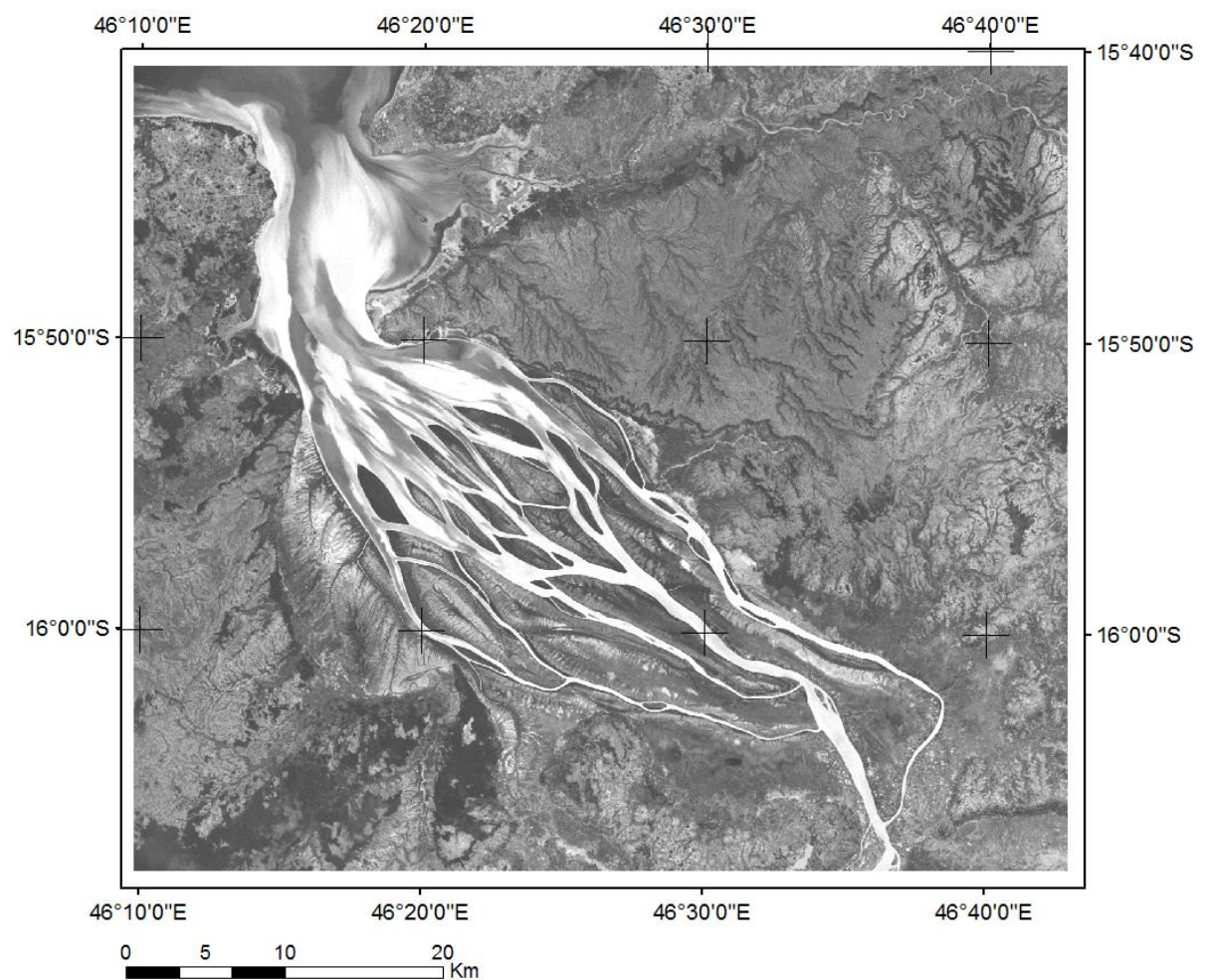
A cutout has been used of the area in the downloaded images with the aim of working in a more homogeneous way.

The cartographic reference system of all the images is WGS84 in projection UTM time zone Northern hemisphere.

Previous to processing the images, a radiometric correction was made to each one of them, and the image of 11/04/1989 has been coregistered.

## Visualisation of suspended sediments

To visualise the suspended sediments, a new band was obtained. This new band was achieved through the division of the red band by the blue band. The white part of the image demonstrates the suspended sediments that the river transports. Also shown in the Figure 7 are the areas of the river that carry a great part of suspended sediments compared to the areas that it does not carry to.



*Figura 41. 1989 image shows the suspended sediment.*

## Observation of shallow waters

Band 1 of satellite Landsat 8 is situated on the fringe of the electromagnetic spectrum between 0,433-0,453  $\mu\text{m}$  which permits the visualisation of the sea bed.

The identification of shallow waters was attained by the Coastal band (band 1) of Landsat 8. Band 1 detects shallow blue and violet water. Its main use is; the formation of images in shallow waters and the tracing of small particles such as smoke or dust.

Due to the fact that Landsat was launched in 2013, there is not much margin of study, but it will help us to find out if there are shallow waters.

In the Figure 8 the trace that the current has left in the river is visible on the river bed, which shows us that the water is shallow in this area.

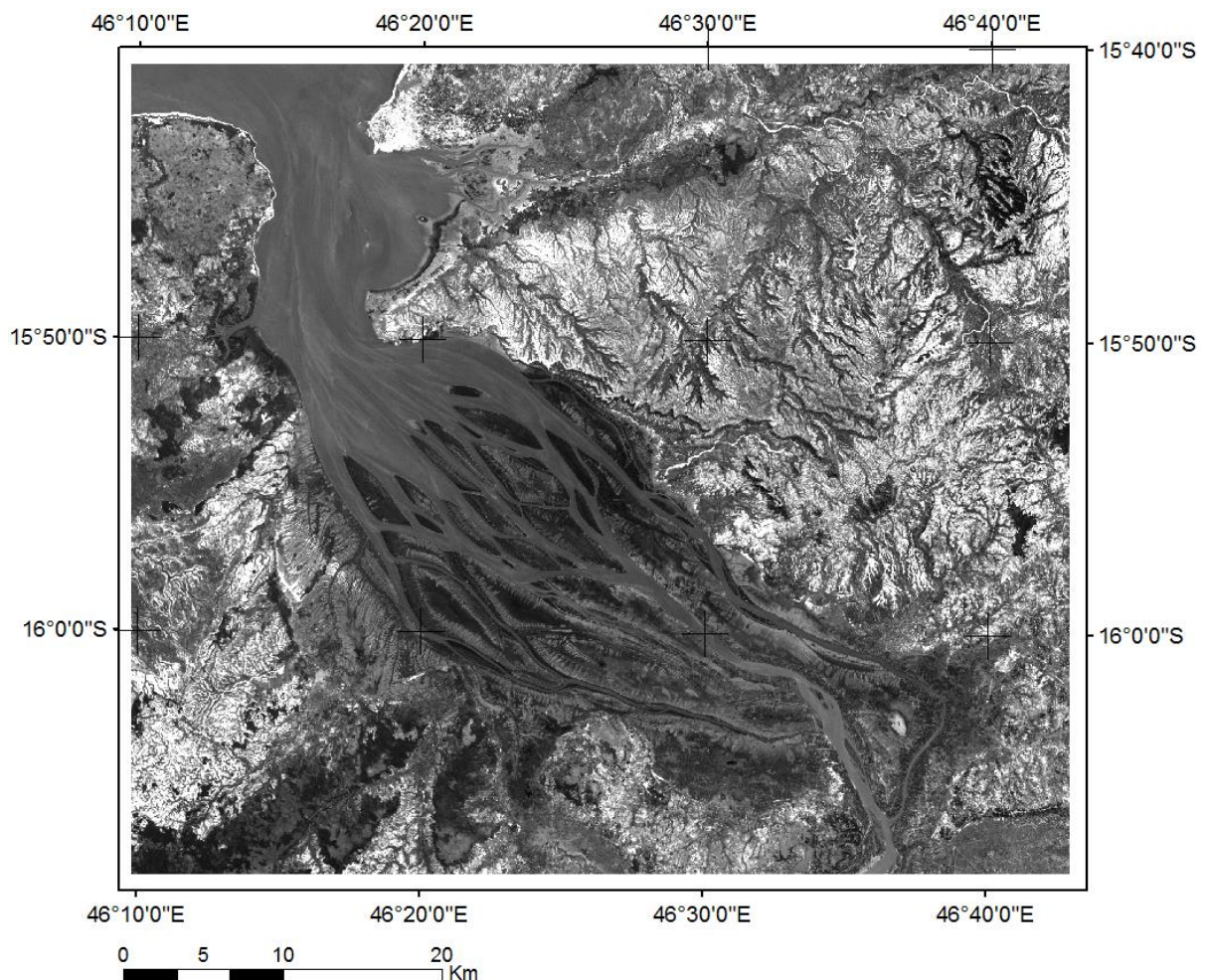


Figure 42. 2013 image shows the shallows.